



矿用电铲斗杆动态疲劳可靠性仿真分析方法

史志远 沈刚 陈翀 温来玉

引用本文:

史志远, 沈刚, 陈翀, 等. 矿用电铲斗杆动态疲劳可靠性仿真分析方法[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 362–374.

SHI Zhiyuan, SHEN Gang, CHEN Chong. Simulation and analysis method for dynamic fatigue reliability of shovel stick for mining electric shovel[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 362–374.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0490>

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 DEMFBD bidirectional coupling technology

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

基于多目标优化的露天矿进度计划编制方法研究

Research on open-pit mine schedule planning method based on multi-objective optimization

煤炭科学技术. 2022, 50(7): 146–155 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/464bebfa-cb95-4529-b181-f60589398c4a>

干旱区露天矿外排土场隔水层重构材料试验研究

Experimental study on reconstruction material of impervious layer in open-pit mine external dump in arid area

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 345–353 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0195>

露天矿软岩复合边坡变形机理分析

Analysis of deformation mechanism of soft rock composite slope in open-pit mine

煤炭科学技术. 2021, 49(8): 108–113 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/68376e51-31b8-45a1-84df-2af1d9a625c1>

北方大型露天矿区土壤有机碳库扰动与恢复研究

Study on disturbance and restoration of soil organic carbon pool in large-scale open-pit mining areas in Northern China

煤炭科学技术. 2023, 51(12): 100–109 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0965>

露天矿内排土场近自然地貌重塑研究——以新疆黑山露天矿为例

Research on the reshaping of the near-natural landform of the internal dump for open-pit mine: a case study of Heishan Open-Pit Mine, Xinjiang, China

煤炭科学技术. 2022, 50(11): 213–221 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/889e1b0d-6604-4c63-b582-c8ddcfd23a7f>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

史志远, 沈 刚, 陈 翀, 等. 矿用电铲斗杆动态疲劳可靠性仿真分析方法[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 362–374.

SHI Zhiyuan, SHEN Gang, CHEN Chong, *et al.* Simulation and analysis method for dynamic fatigue reliability of shovel stick for mining electric shovel[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 362–374.

矿用电铲斗杆动态疲劳可靠性仿真分析方法

史志远¹, 沈 刚², 陈 翀¹, 温来玉³

(1. 安标国家矿用产品安全标志中心有限公司, 北京 100013; 2. 安徽理工大学 机械工程学院, 安徽 淮南 232001; 3. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 为了减少露天矿用电铲作业过程中随机载荷导致的斗杆断裂现象, 提出一种矿用电铲斗杆动态可靠性仿真分析方法。基于矿用电铲实际尺寸参数构建其挖掘和提升部件三维模型, 结合其机械系统和电气系统耦合作用, 建立工作装置 ADAMS-Matlab/Simulink 机电仿真模型, 获得不同工况下斗杆危险点应力曲线; 通过雨流计数法统计应力数据, 获取应力幅值、均值和峰值的分布特征, 经应力修正得到多级载荷特征参数; 采用 Schaff 非线性理论建立多级载荷作用下矿用电铲斗杆的剩余强度模型, 结合全域应力-寿命曲线, 得到矿用电铲斗杆的强度退化规律; 基于应力-强度干涉理论建立矿用电铲斗杆弯曲疲劳失效极限状态函数, 建立矿用电铲斗杆动态可靠性模型, 采用主动学习 Kriging 和 Monte Carlo 模拟法结合的方法(AK-MCS)计算得到强度退化过程下斗杆的时变疲劳可靠度, 提出斗杆的阶段性维护策略。仿真分析发现, 不同工况下弯曲疲劳可靠度衰减速度变化趋势一致, 均是先慢后快, 但受剩余强度衰减速度影响, 100% 满斗率工况下斗杆弯曲疲劳可靠度衰减时间更早、衰减速度更快, 斗杆发生疲劳失效时间提前。结果表明: 矿用电铲斗杆动态疲劳可靠性仿真分析方法可以得到复杂工况下矿用电铲斗杆的危险点应力特征和时变疲劳可靠度, 为矿用电铲斗杆的可靠性设计与维护提供依据。

关键词: 露天开采; 矿用电铲; 刚柔耦合仿真; 强度退化; 疲劳可靠性

中图分类号: TD42 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2025)08-0362-13

Simulation and analysis method for dynamic fatigue reliability of shovel stick for mining electric shovel

SHI Zhiyuan¹, SHEN Gang², CHEN Chong¹, WEN Laiyu³

(1. China Mining Products Safety Approval and Certification Center, Beijing 100013, China; 2. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to reduce the stick fracture caused by random load during the operation of the electric shovel in open-pit mines, a simulation and analysis method of the dynamic reliability of the stick of the electric shovel in the mining was proposed. Based on the actual size parameters of the mining shovel, the three-dimensional model of the excavation and lifting parts was constructed, and the ADAMS-Matlab/Simulink electromechanical simulation model of the working device was established in combination with the coupling effect of the mechanical system and the electrical system, and the stress curves of the dangerous points of the stick under different working conditions were obtained. The stress data were counted by the rainflow counting method, and the distribution characteristics of stress amplitude, mean and peak value were obtained, and the multi-level load characteristic parameters were obtained by stress correction. The Schaff non-linear theory was used to establish the residual strength model of the shovel stick under multi-stage load, and the strength degradation law

收稿日期: 2025-04-09 策划编辑: 常 琛 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.12438/cst.2025-0490

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U21A20125)

作者简介: 史志远(1980—), 男, 河北承德人, 研究员, 博士。E-mail: shizhiyuancumt@126.com

通讯作者: 温来玉(2002—), 男, 安徽滁州人, 硕士研究生。E-mail: ts23050058a31@cumt.edu.cn

of the shovel stick was obtained by combining the global stress-life curve. Based on the stress-strength interference theory, the bending fatigue failure limit state function of the mining power shovel stick was established, the dynamic reliability model of the mining power shovel stick was established, and the time-varying fatigue reliability of the stick under the strength degradation process was calculated by using the method of active learning Kriging and Monte Carlo simulation method (AK-MCS), and the phased maintenance strategy of the stick was proposed. The simulation analysis shows that the attenuation rate of bending fatigue reliability under different working conditions is consistent, which is slow first and then fast, but due to the influence of the residual strength attenuation rate, the attenuation time of the bending fatigue reliability of the stick is earlier and faster under the condition of 100% full bucket rate, and the fatigue failure time of the stick is advanced. The results show that the dynamic fatigue reliability simulation analysis method of mining electric shovel stick can obtain the stress characteristics of dangerous points and time-varying fatigue reliability of mining electric shovel stick under complex working conditions, which provides a basis for the reliability design and maintenance of mining electric shovel stick.

Key words: open-pit mining; mining electric shovel; rigid flexible coupling simulation; strength degradation; fatigue reliability

0 引 言

露天开采是矿产资源开采的重要方式,推动着国内外采矿业的经济不断发展^[1-2]。矿用电铲具有对矿山作业环境要求较低、能够适应极端条件、单铲挖掘能力强以及满斗率高等优点,在露天矿开采中广泛使用^[3]。矿用电铲的工作装置是执行挖掘装载工作的主要装置,由提升机构和推压机构组成,在工作过程中频繁受到交变载荷和随机载荷的影响^[4],斗杆作为关键部件,其可靠性会直接影响装备的效率和安全性。因此,针对矿用电铲工作装置的剩余强度和疲劳可靠性进行分析是十分有必要的。

挖掘作业时,电铲铲斗与被挖掘物料相互作用,铲斗受到很大的动态挖掘阻力;此外,露天矿开采过程物料堆面复杂多变且物料破碎块度不均匀、硬度不一共同导致电铲铲斗负载具有随机不确定性^[5]。受工作条件影响,装载作业频繁反复,使得工作装置负载具有交变特性。工作装置负载特性的获取也具有一定难度,屈磊^[6]根据电铲结构特点和工作特性,建立电铲 ADAMS 虚拟样机模型,对电铲挖掘过程进行动力学仿真,获得斗杆提升力和推压力变化曲线。目前关于电铲工作装置的动态特性研究较少,挖掘机与电铲在结构、工况和应用场景上都具有相似性,因此,可以参考挖掘机负载特性研究方面的研究,冯豪等^[7]综合考虑结构弹性、油缸特性、作业对象等因素提出挖掘机挖掘动力学系统模型,解决了挖掘动载荷计算问题;秦威等^[8]针对挖掘机工作装置的运动受力分析,建立铲斗齿间挖掘阻力同油缸各相关组成部分之间的联系,测量动臂油缸、斗杆油缸以及铲斗油缸位移及应力,间接求得铲斗齿间所受的挖掘阻力的力时间历程;张净华^[9]计算了挖掘机的挖掘力和挖掘阻力,利用仿真软件得到工作装置上评估点的应力-时间变化曲线;万丽荣等^[10]基于

离散元原理,采用 EDEM-ADAMS 耦合仿真的方法,对不同工况下挖掘机挖掘过程进行分析;刘菊蓉等^[11]结合挖掘阻力和铰点载荷谱对铲斗静力学和疲劳寿命进行协同分析;刘广军等^[12]使用有限元分析软件和动力学仿真软件建立挖掘机刚-柔耦合模型,并以各油缸位移曲线为驱动,得到动臂及斗杆上各点应力;刘畅等^[13]利用多体动力学软件 ADAMS 建立液压挖掘机虚拟样机模型,并利用离散元软件 EDEM 建立物料模型,通过 DEM-MBD 耦合仿真分析方法,对液压挖掘机工作装置进行动力学仿真分析。仿真分析是研究挖掘机负载的有效手段之一,应考虑真实结构和实际工况的影响。徐丹等^[14]分析了挖掘机工作装置结构及其液压缸摩擦力,研究发现斗杆液压缸所受的力比不考虑液压缸摩擦力时稍小,铲斗液压缸受力明显比不考虑液压缸摩擦力的情况大许多,考虑液压系统特性所获得的液压挖掘机负载曲线更接近于实际工作测量值。赵子豪等^[15]提出一种基于 DMDS 瞬态特性的接合/分离驱动模式切换控制方法来减小电机驱动系统工作特性对负载的影响,可见研究工作装置负载特性时不能忽略电气系统的动态特性的影响。因此,对电铲进行动力学仿真时需考虑其电气系统的动态特性。

在随机载荷、交变载荷产生的交变应力重复作用下,零件材料内部逐渐产生疲劳累积损伤,导致零件的强度发生退化,引起机械装置可靠性动态变化。李宏仲等^[16]考虑风载荷对齿轮的疲劳损伤,建立了考虑齿轮结构强度退化的动态可靠性模型;周志刚等^[17-18]基于线性损伤原理提出了风电齿轮传动系统的动态可靠性模型,研究了强度退化对系统可靠度的影响规律。路志成等^[19]以轮齿的强度退化表征疲劳效应,基于非线性疲劳损伤累积理论建立剩余强度模型,在传统应力-强度干涉理论的基础上,得到随机风载作用下齿轮传动系统动态可靠度功能函数;

宋礼睿等^[20]结合线性损伤理论和非线性损伤理论的对比,获得轴承的接触疲劳寿命和动态可靠度;屈衍静等^[21]考虑零件材料性能退化因素,利用动态应力-强度干涉模型建立基于强度退化的齿轮可靠性的计算模型;高玉闪等^[22]将载荷、材料疲劳特性随机性及载荷水平对材料疲劳特性随机性的影响引入结构振动疲劳寿命评估,使用有限元仿真获得了管道危险点应力曲线,通过可靠性仿真分析证明了随机性模型的适用性及寿命模型的高效性。矿用电铲一个挖掘周期内要实现挖掘、卸料等动作,工作装置负载动态变化,电气驱动系统的工作特性也不能忽略,不易通过理论建模分析负载特性;此外,矿用电铲结构复杂,造价成本高,开展矿用电铲服役期内工作装置强度退化的疲劳可靠性试验比较困难。

为了高效准确评估服役期内矿用电铲工作装置的可靠性,笔者基于实际尺寸构建了矿用电铲挖掘与提升部分的三维模型,将矿用电铲工作装置的机械系统和电气系统模型进行结合,构建矿用电铲工作装置刚柔耦合机-电联合仿真模型,结合应力-强度干涉理论建立矿用电铲斗杆弯曲疲劳失效极限状态函数,得到斗杆疲劳可靠性模型,采用 AK-MCS 方法计算可靠度。

1 矿用电铲机电联合仿真

矿用电铲工作装置如图 1 所示,包括提升机构和推压机构,主要由铲斗、连杆、斗杆、动臂、电机和钢丝绳等构成。

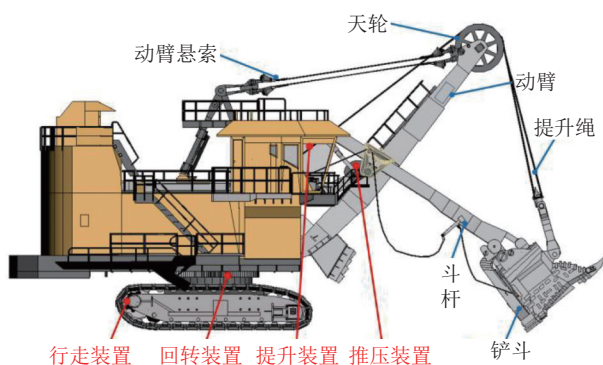


图 1 矿用电铲工作装置
Fig.1 Mining electric shovel working device

1.1 矿用电铲机电联合仿真模型

矿用电铲在工作过程中机械系统和电气系统协同作用,使用 solidworks 参照实际电铲尺寸建立三维模型,将模型保存为 .xt 格式导入 adams 建立矿用电铲虚拟样机,如图 2 所示,虚拟样机作为动力学仿真的载体,在各个零件连接处创建约束、运动副和驱动,

并验证样机自由度,零件的材料设置为 steel;添加的约束主要为运动副、旋转副、固定副,其中推压齿轮与斗杆、鞍座与斗杆之间均添加接触力。为减少仿真的计算量和时间,仅对变形较大、较为容易失效的斗杆部件进行柔性化处理,其余部件则视为刚性体。在 hypermesh 中对电铲斗杆进行网格划分,导出 .bin 格式斗杆柔性体,在 adams 中进行刚柔耦合仿真。

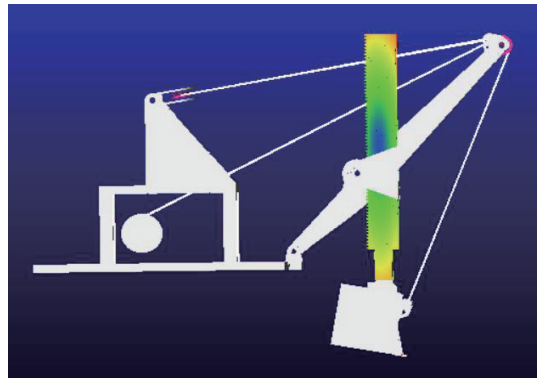
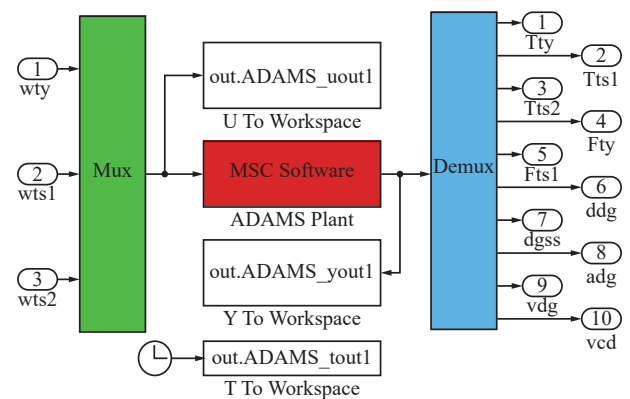


图 2 虚拟样机
Fig.2 Virtual prototyping

将 adams 中搭建的刚柔耦合模型导入到 simiulink 中生成机械系统子模型如图 3 所示,机械子系统模型用于考虑电机系统仿真模型获得的真实力矩特性,驱动虚拟样机运行。



注:输入部分:wty为推压电机转速,wts1为提升电机1转速,wts2为提升电机2转速。
模块:3个To Workspace模块用于将输出数据记录到相应变量中,ADAMS Plant为adams中的机械系统模型。
输出部分:Tty为推压电机转矩,Tts1为提升电机1转矩,Tts2为提升电机2转矩,Fty为推压力,Fts1为提升力,ddg为斗杆位移,dgss为钢丝绳位移,adg为斗杆倾角,vdg为斗杆速度,vcd为铲斗质心速度。

图 3 机械子系统模型
Fig.3 Mechanical subsystem model

在 simiulink 中搭建驱动电机仿真模型,通过 adams/control 模块连接形成矿用电铲工作装置 ADAMS-Matlab/Simulink 刚柔耦合机电联合仿真模型,如图 4 所示,矿用电铲刚柔耦合机电联合仿真模

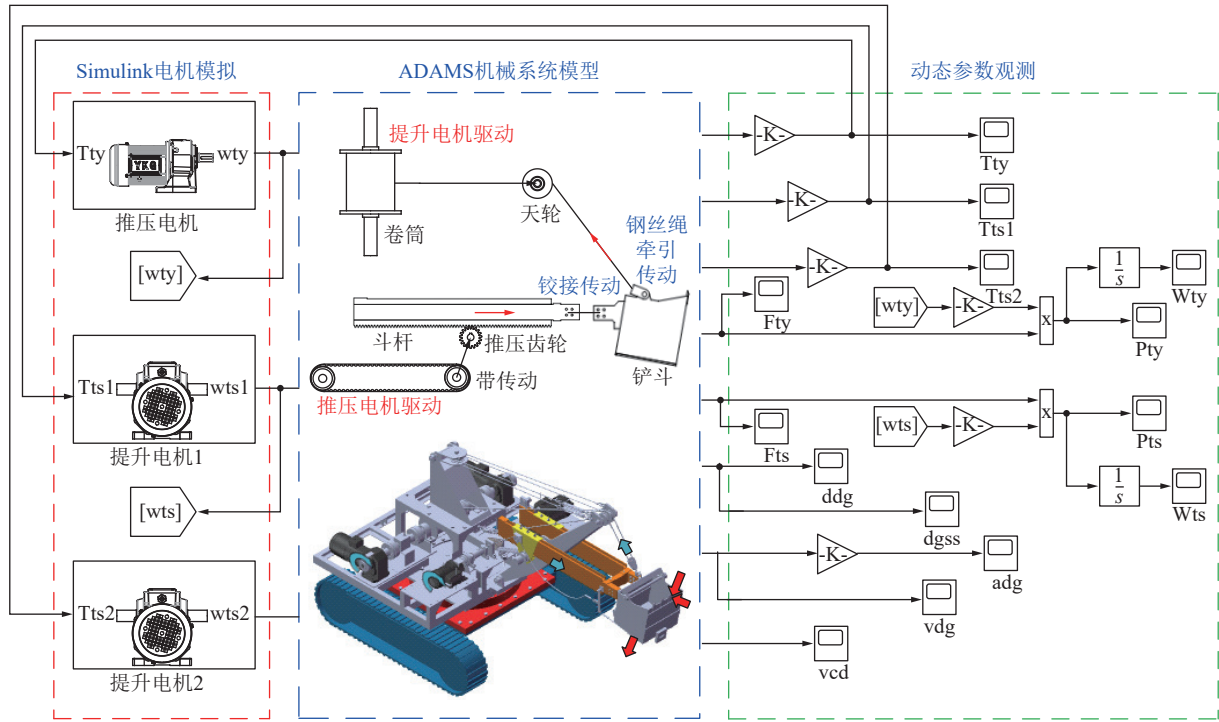


图 4 矿用电铲机电联合仿真模型

Fig.4 Mechanical and electrical joint simulation model of mining electric shovel

型包含 adams 刚柔耦合动力学模型和 simulink 电气驱动系统模型,考虑了斗杆的疲劳变形,对斗杆部件进行柔性化处理,还考虑了电气驱动系统的动态特性,将电机转速代入电气系统模型获得力矩驱动机械子系统运动,进行动力学仿真,获得电铲一个挖掘周期内的斗杆应力动态特征。

1.2 电机系统模型

电气系统由一台推压电机和两台提升电机组成,这 3 台电机各自配备了独立的驱动系统。在 Simulink 搭建如图 5 所示的电机系统仿真模型,该模型在仿真中将输出力矩带动机械子系统运动。ADAMS 软件所计算出的数据会输出并传输至 Simulink 中,随后 Simulink 将其计算成果回传至 ADAMS 中,作为新一轮的输入数据,实现 2 个系统不断地进行数据交换和更新,保持仿真过程的连续性和一致性。仿真得到的提升电机角速度曲线、推压电机角速度曲线分别如图 6 和图 7 所示。

1.3 矿用电铲机电联合仿真模型验证

矿用电铲试验样机如图 8 所示,由控制柜、提升装置、推压装置、回转平台、行走装置和开斗平台等部分组成,工作时由推压装置的电机带动同步带驱动推压齿轮,提升装置由电机带动卷筒转动,从而牵引钢丝绳,二者相互配合使斗杆能完成挖掘工作。推压电机安装有扭矩传感器,钢丝绳与回转平台的固定端装有拉压力传感器,对原始数据进行滤波处

理后直接得到滚筒提升力,结合推压电机轴几何参数依据力矩转换公式得到齿轮推压力。

矿用电铲进行物料挖掘作业时,铲斗的斗齿尖端与物料发生直接接触,从而产生挖掘阻力。由于准确计算这种阻力较为困难,为了简化计算过程,通常根据经验公式将挖掘阻力 F 分为 2 个分量:一个分量是沿着铲斗斗齿尖端轨迹的切线方向的 F_τ ,另一个分量则沿着轨迹的法线方向的 F_n 。

根据经验公式^[23-24],可得切向阻力为:

$$F_\tau = \sigma_w b' c' \quad (1)$$

式中: σ_w 为挖掘比阻力, N/mm^2 ; b' 为铲斗宽度, mm ; c' 为切削层厚度, mm 。

法向分力的大小一般以切向分力的百分值来表示,即

$$F_n = \psi F_\tau \quad (2)$$

式中: ψ 为比例系数,通常取 $\psi = 0.1 \sim 0.2$,本文选取 $\psi = 0.15$ 。

记满载物料重力为 G_w

$$G_w = \rho V g \quad (3)$$

式中: ρ 为物料密度, kg/m^3 ; V 为铲斗容积, m^3 ; g 为重力加速度取 9.8 m/s^2 。

实验台尺寸和挖掘物料相关参数如下: $\sigma_w = 6 \times 10^{-2} \text{ N/mm}^2$, $b = 350 \text{ mm}$, 物料堆角为 40° , 切削

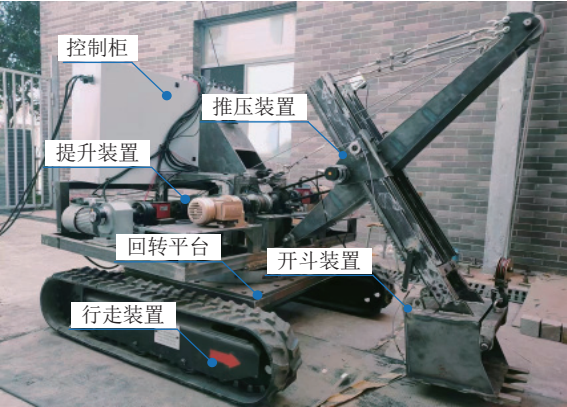


图 8 矿用电铲试验样机
Fig.8 Mining electric shovel test prototype

表 1 实验负载参数设置
Table 1 Experimental load parameter setting

负载参数	Function
切向挖掘阻力	$\text{step}(\text{time}, 0, 0, 4.2, 358.02) + \text{step}(\text{time}, 4.2, 0, 6.66, -358.02)$
法向挖掘阻力	$\text{step}(\text{time}, 0, 0, 4.2, 53.703) + \text{step}(\text{time}, 4.2, 0, 6.66, -53.703)$
物料重力	$\text{step}(\text{time}, 0, 0, 4.43, 202.86) + \text{step}(\text{time}, 4.43, 0, 6.66, 202.86)$

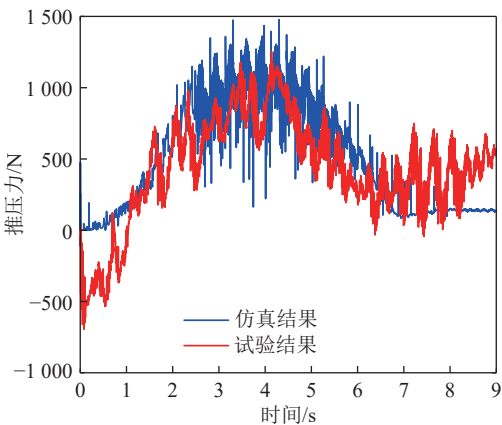


图 9 推压力仿真与试验对比
Fig.9 Comparison diagram between simulation and experiment of pushing force

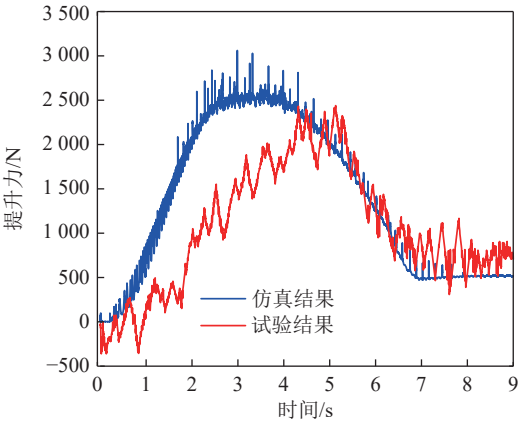


图 10 提升力仿真与试验对比
Fig.10 Comparison diagram of lifting force simulation and experiment

致了曲线在形态上呈现出较为明显的变化趋势,且波动比较大,而在挖掘的初期和后期,由于作用力较小,曲线的波动也相对较小。由此,可以确定该虚拟样机可以较为准确地反映实际工作条件下矿用电铲的状态。

1.4 矿用电铲斗杆的最大应力仿真

矿用电铲在实际作业过程中会同时受到动、静载荷作用,从而产生交变应力导致斗杆产生振动和疲劳破坏。矿用电铲工作装置的负载主要与铲斗的满斗率有关,一般挖掘过程中,受物料颗粒大小和黏度等因素影响,满斗率一般在 70% 以上。本文基于搭建的刚柔耦合动力学仿真模型,对满斗率 70% 和满斗率 100% 两种最具代表性的工况进行仿真,设真实矿用电铲铲斗尺寸及挖掘物料参数如下: $b=3.5\text{ m}$, 物料堆角为 40° , $\rho=1.5\times 10^3\text{ kg/m}^3$, $V=28.98\text{ m}^3$,代入式(1)一式(3)得到 $F_r=375\,921\text{ N}$, $F_n=56\,388.15\text{ N}$, 100% 满斗率工况下 $G_w=608\,580\text{ N}$, 70% 满斗率工况下 $G_w=426\,006\text{ N}$,在 adams 中各工况参数见表 2,分析一个工作周期内电铲斗杆的最大应力。虚拟样机仿真运动为 0~4.2 s 内,电铲铲斗铲入物料堆中,铲斗所受的切向、法向挖掘阻力逐渐增大;4.2~6.66 s 内铲斗渐渐离开物料堆中,挖掘阻力减小,并在 6.66 s 时减小为 0;铲斗内物料的重力则在 0~6.66 s 内增加,6.66 s 时达到最大然后保持到 8.6 s 后卸货。

表 2 不同工况负载参数设置
Table 2 Setting of load parameters for different operating conditions

负载参数	Function
切向挖掘阻力	$\text{step}(\text{time}, 0, 0, 4.2, 375\,921) + \text{step}(\text{time}, 4.2, 0, 6.66, -375\,921)$
法向挖掘阻力	$\text{step}(\text{time}, 0, 0, 4.2, 56\,388.15) + \text{step}(\text{time}, 4.2, 0, 6.66, -56\,388.15)$
70% 满斗率物料重力	$\text{step}(\text{time}, 0, 0, 6.66, 213\,003) + \text{step}(\text{time}, 8.6, 0, 9, 213\,003)$
100% 满斗率物料重力	$\text{step}(\text{time}, 0, 0, 6.66, 304\,290) + \text{step}(\text{time}, 8.6, 0, 9, -304\,290)$

以物料重力大小不同来区分不同工况,重力变化如图 11 所示。

两种工况下,工作装置承受的推压力如图 12,提升力如图 13 所示。起步阶段,推压齿轮推动斗杆向前,使铲斗齿尖靠近挖掘物料。随着铲斗铲入物料,作用在铲斗上的物料重力、挖掘阻力逐渐增大,并通过螺栓连接将受力传递到铲斗上。之后,作用在铲斗上的力逐步减小,应力也随之减小,直到卸货后回到初始值。如图 14 所示,挖掘阻力与物料重力的和的最大值出现在 4.2 s,此时斗杆上的最大应力约为

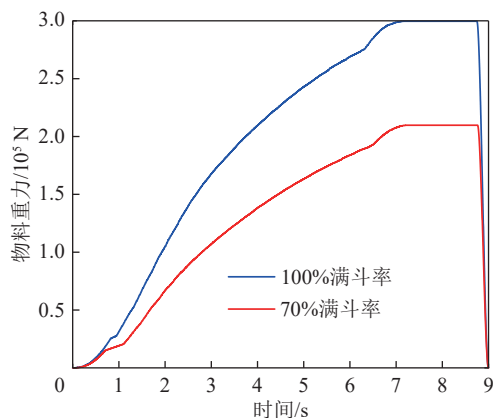


图 11 不同工况下物料重力

Fig.11 Gravity of materials under different working conditions

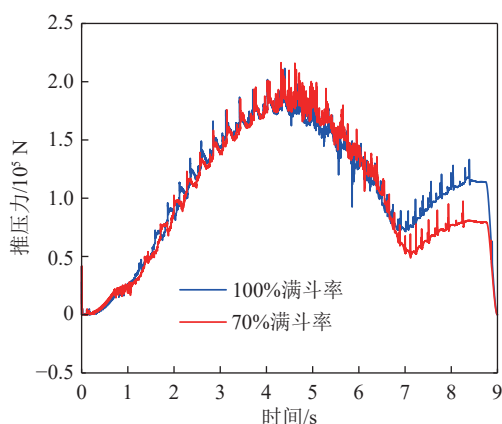


图 12 不同工况推压力

Fig.12 Pushing pressure under different working conditions

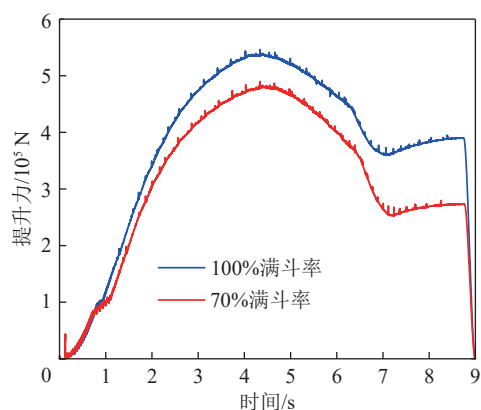


图 13 不同工况下提升力

Fig.13 Lifting force under different working conditions

150 MPa。应力分布如图 15 所示, 图中红色位置为危险点, 该位置受到推压齿轮与鞍座对斗杆产生的挤压力和铲斗上的阻力与物料重力的共同作用。

2 矿用电铲斗杆应力数据统计

基于应力-强度干涉理论建立斗杆疲劳可靠性模型, 需要先对应力数据进行统计, 建立多级载荷谱

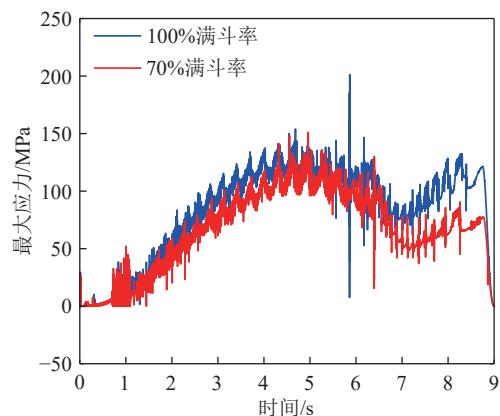


图 14 不同工况下最大应力

Fig.14 Maximum stress under different working conditions

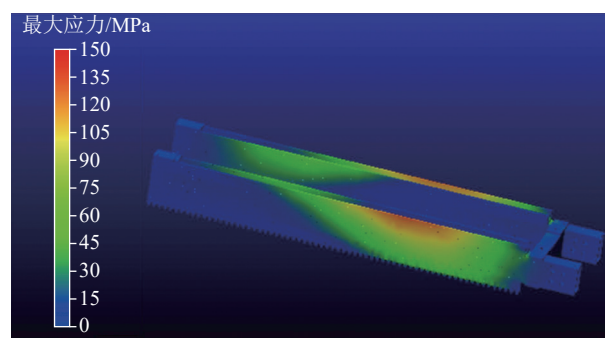


图 15 斗杆应力最大时刻的分布云图

Fig.15 Cloud map of distribution at the moment of maximum stress on the stick

和斗杆剩余强度模型。采用雨流计数法对应力曲线进行计数统计, 得到 70% 满斗率电铲斗杆弯曲应力均值和应力幅值分布直方图如图 16 和图 17 所示, 100% 满斗率电铲斗杆弯曲应力均值和应力幅值分布直方图如图 18 和图 19 所示。拟合发现 70% 满斗率工况下应力均值近似服从均值为 90 MPa, 标准差为 22 MPa 的正态分布, 100% 满斗率工况下应力均

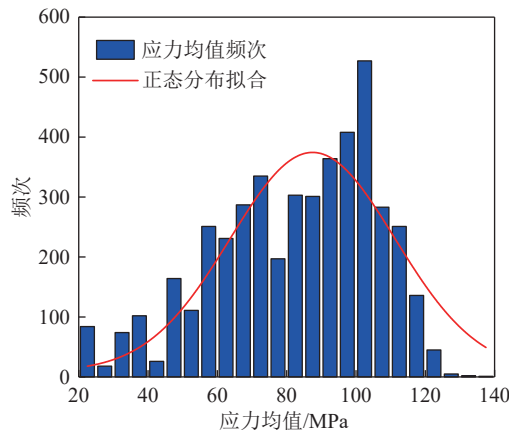


图 16 70% 满斗率电铲斗杆弯曲应力均值统计

Fig.16 Statistics of average bending stress of 70% full bucket rate electric shovel bucket rod

值近似服从均值为 110 MPa, 标准差为 16 MPa 的正态分布, 应力幅值近似服从威布尔分布, 符合工程实际。

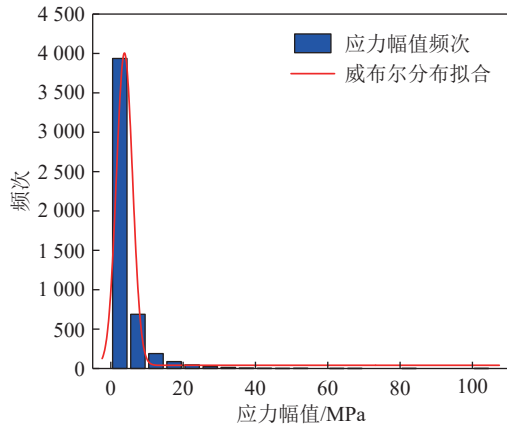


图 17 70% 满斗率电铲斗杆弯曲应力幅值统计
Fig.17 Statistics of bending stress amplitude of 70% full bucket rate electric shovel bucket rod

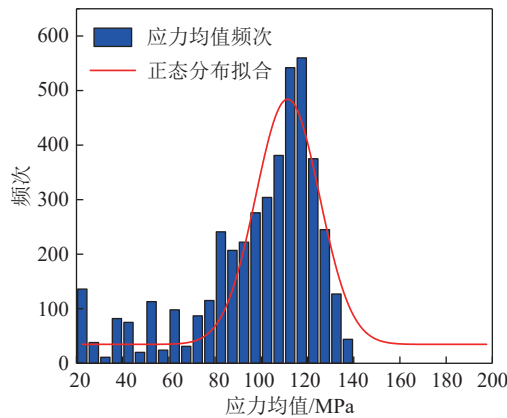


图 18 100% 满斗率电铲斗杆弯曲应力均值统计
Fig.18 Statistical analysis of the average bending stress of the bucket rod of a 100% full bucket rate electric shovel

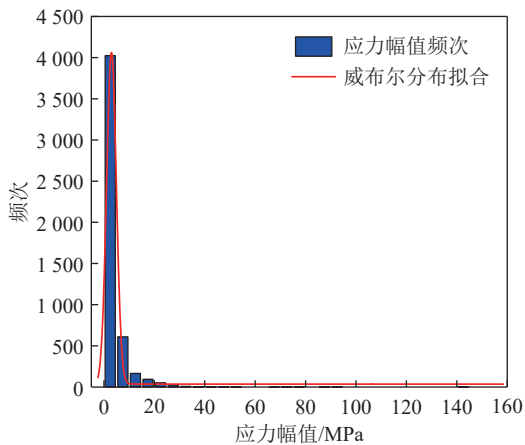


图 19 100% 满斗率电铲斗杆弯曲应力幅值统计
Fig.19 100% full bucket rate electric shovel bucket rod bending stress amplitude statistics

图 20 和图 21 分别为统计得到的 70% 满斗率电铲斗杆的应力峰值 S_{n1} 和 100% 满斗率电铲斗杆的应力峰值 S_{n2} 的分布情况, 经过拟合, S_{n1} 、 S_{n2} 近似服从均值为 88 MPa, 标准差为 23 MPa 和均值为 113 MPa, 标准差为 13 MPa 的正态分布。

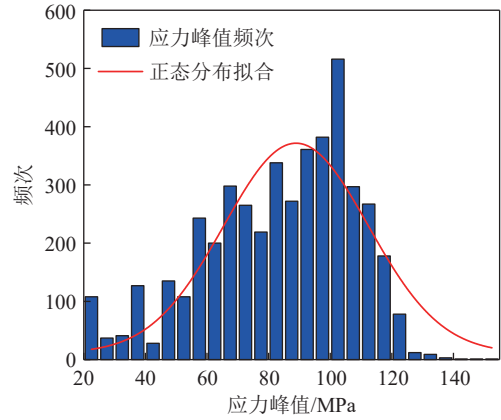


图 20 70% 满斗率电铲斗杆弯曲应力峰值统计
Fig.20 Statistics of peak bending stress of 70% full bucket rate electric shovel bucket rod

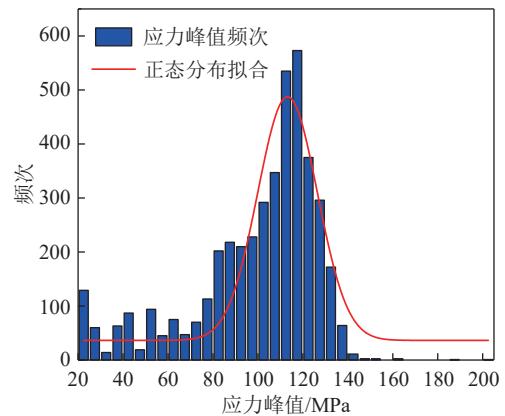


图 21 100% 满斗率电铲斗杆弯曲应力峰值统计
Fig.21 Statistics of peak bending stress of the bucket rod of a 100% full bucket rate electric shovel

3 矿用电铲斗杆动态可靠度分析

3.1 矿用电铲斗杆弯曲疲劳可靠性模型

考虑不同材料在疲劳过程中的剩余强度退化规律不同, 本文分析结构为金属材料, 非线性疲劳累积损伤理论中 Schaff 提出的非线性剩余强度模型^[25]与金属疲劳特性相吻合, 精度较高, 在寿命预测中同样得到了广泛应用, 因此本文采用 Schaff 非线性剩余强度模型对矿用电铲斗杆弯曲疲劳剩余强度进行分析, Schaff 剩余强度模型 $\delta(n)$ 可表述为

$$\delta(n) = \delta(0) - [\delta(0) - S_k] \left(\frac{n}{N} \right)^c \quad (4)$$

式中: $\delta(0)$ 为初始强度极限; S_k 、 n 分别为循环载荷的峰值、作用次数; N 为循环载荷 S_k 对应的疲劳寿命, 上标 c 为强度退化系数。

为了得到多级载荷作用下的斗杆弯曲剩余强度模型, 提出如下假设: 斗杆结构在载荷 S_1 下经历 n_1 次循环, 在载荷 S_2 下经历 n_2 次循环... 在载荷 S_k 下经历了 n_k 次循环, 各级载荷下的疲劳寿命分别为 N_1 , N_2, \dots, N_k , $n = \sum_{i=1}^k n_i$, 若依照强度退化量相等的原则, 在 n_1 次循环后剩余强度 $\delta(n_1)$ 为

$$\delta(n_1) = \delta(0) - [\delta(0) - S_1] \left(\frac{n_1}{N_1} \right)^{c_1} \quad (5)$$

则在 n_1 次循环后结构的强度退化量为

$$\delta(0) - \delta(n_1) = [\delta(0) - S_1] \left(\frac{n_1}{N_1} \right)^{c_1} \quad (6)$$

假设在载荷 S_2 作用下造成同样损伤 (即产生相同的强度退化量), 且该损伤是由 n_{21} 次循环造成的, 即

$$\delta(0) - \delta(n_{21}) = \delta(0) - \delta(n_1) \quad (7)$$

$$\delta(n_{21}) = \delta(0) - [\delta(0) - S_2] \left(\frac{n_{21}}{N_2} \right)^{c_2} \quad (8)$$

结合式(5)和式(8)可得:

$$[\delta(0) - S_1] \left(\frac{n_1}{N_1} \right)^{c_1} = [\delta(0) - S_2] \left(\frac{n_{21}}{N_2} \right)^{c_2} \quad (9)$$

由此可推得等效的循环作用次数

$$n_{21} = N_2^{c_2} \sqrt[c_2]{\frac{[\delta(0) - S_1] \left(\frac{n_1}{N_1} \right)^{c_1}}{[\delta(0) - S_2]}} \quad (10)$$

以上假设可理解为在载荷 S_1 作用下经过 n_1 次循环造成的强度退化量等效于载荷 S_2 作用 n_{21} 次的退化量, 将其统一用载荷 S_2 进行表达, 得在 n_1 和 n_2 次循环后, 剩余强度为

$$\delta(n_1 + n_2) = \delta(n_{21} + n_2) = \delta(0) - [\delta(0) - S_2] \left(\frac{n_{21} + n_2}{N_2} \right)^{c_2} \quad (11)$$

由上等效方法依次类推, 可得到一般性结论, 即用 S_k 等效其余各级载荷造成的强度退化, 得到多级载荷下剩余强度的表达式为

$$\delta(n) = \delta(0) - [\delta(0) - S_k] \left(\frac{n_k + n_{k(k-1)}}{N_k} \right)^{c_k} \quad (12)$$

式中:

$$n_{k(k-1)} = N_k^{c_k} \sqrt[c_k]{\frac{[\delta(0) - S_{k-1}] \left(\frac{n_{(k-1)(k-2)} + n_{(k-1)}}{N_{k-1}} \right)^{c_{k-1}}}{[\delta(0) - S_k]}} \quad , k \geq 3 \quad (13)$$

式中: $\delta(0)$ 为初始静强度; S_k 、 n_k 分别为第 k 级循环载

荷峰值、作用次数; N_k 为第 k 级循环载荷的疲劳寿命 3; c_k 为 S_k 载荷作用时材料的强度退化系数。

由剩余强度模型可知, 每级载荷对应的疲劳寿命对剩余强度均具有重要影响, 寿命需根据 $S-N$ 曲线获得。传统的 $S-N$ 曲线 (S 为应力幅值, N 为循环次数) 一般认为零件到达疲劳寿命极限后的区域为无限寿命区, 应力低于疲劳寿命极限的循环载荷不会对零件造成损伤。然而矿用电铲斗杆承受较高频次的低于疲劳寿命极限的循环载荷, 因此本研究采用 Bandara^[26] 等提出的全域 $S-N$ 曲线模型, 考虑超高周循环应力造成的损伤, 电铲斗杆材料选用 Q345 合金钢, 材料应力与寿命的关系如下:

$$\sigma(N) = a(N+B)^b + C \quad (14)$$

$$a = \frac{\sigma_{\text{GCF}} - \sigma_K}{N_{\text{GCF}}^b - N_K^b} \quad (15)$$

$$C =$$

$$\frac{1}{2} \left[\frac{(\sigma_{\text{GCF}} + \sigma_K)(N_{\text{GCF}}^b - N_K^b) - (\sigma_{\text{GCF}} - \sigma_K)(N_{\text{GCF}}^b + N_K^b)}{N_{\text{GCF}}^b - N_K^b} \right] \quad (16)$$

式中: $B = [(\sigma_u - C)/a]^{1/b}$; $b = -0.2$; σ_{GCF} 为超高周疲劳强度, 可表示为:

$$\sigma_{\text{GCF}} = \frac{\sigma_u^{1/3}}{1000} (Hv + 120)(155 - 7 \lg N_{\text{GCF}}) \quad (17)$$

式中: Hv 为维氏硬度, 取值为 330; σ_u 为抗拉强度, Q345 合金钢的抗拉强度为 510 MPa, σ_K 为弯曲疲劳极限, 本研究选取循环加载 3×10^6 次, 存活率为 99.9% 的应力作为弯曲疲劳极限, 因此取 $\sigma_K = 345$ MPa, $N_K = 3 \times 10^6$; 另外将 $N_{\text{GCF}} = 1 \times 10^{10}$ 带入公式求出 σ_{GCF} , 将两组应力和寿命代入公式, 获得斗杆弯曲疲劳的全域 $S-N$ 曲线如图 22 所示。

斗杆的 $S-N$ 曲线是在对称循环应力条件下得到

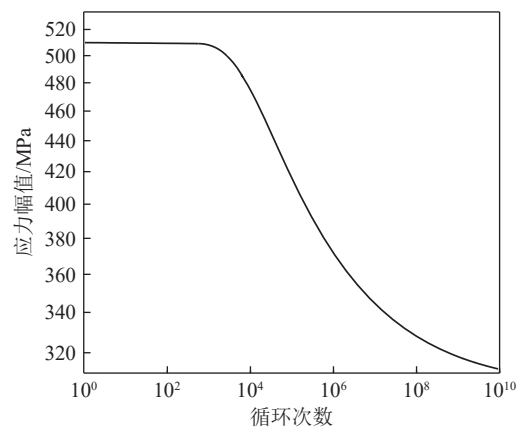


图 22 斗杆弯曲疲劳全域 $S-N$ 曲线

Fig.22 Bending fatigue global $S-N$ curve of bucket arm

的,而电铲斗杆承受载荷为非对称循环应力,因此需采用 Goodman 曲线方程^[27]进行修正,可表示为

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_b} = 1 \tag{18}$$

式中: S_a 为应力幅值; S_e 为等效循环应力幅值; S_m 为应力均值; S_b 为强度极限。修正后的等效循环应力幅值如图 23 和图 24 所示。

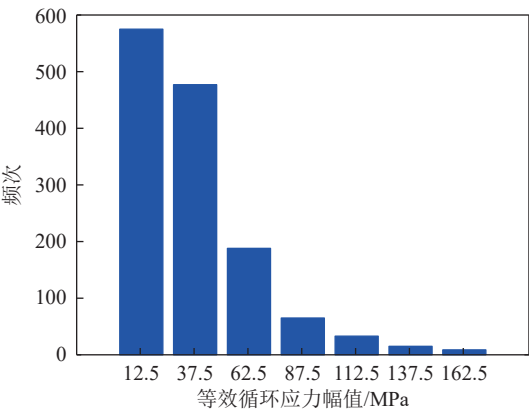


图 23 修正后 70 % 满斗率一个周期内等效循环应力幅值
Fig.23 Revised equivalent cyclic stress amplitude within one cycle at 70% full bucket rate

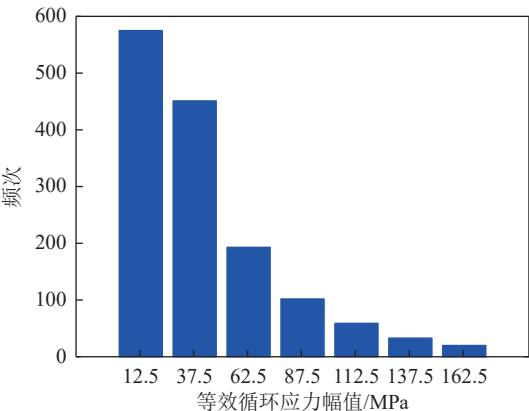


图 24 修正后 100 % 满斗率一个周期内等效循环应力幅值
Fig.24 Modified equivalent cyclic stress amplitude within one cycle at 100% full bucket rate

根据应力强度干涉理论可知,应力大于强度时齿根即发生失效,两者分布的干涉区域即为可能失效区。因此,可以得到随时间变化的动态可靠度模型,建立矿用电铲斗杆弯曲疲劳失效极限状态函数,其表达式为

$$g(X,t) = \delta(t) - S(t) \tag{19}$$

式中: $\delta(t)$ 为斗杆强度随机变量, $S(t)$ 为斗杆应力随机变量。结合式 (12), 极限状态函数可进一步表示为

$$g(X,t) = \delta(0) - [\delta(0) - S_k] \left(\frac{n_k f + n_{k(k-1)} f}{N_k} \right)^c - S(t) \tag{20}$$

式中: T 为矿用电铲工作周期, $T = 9 \text{ s}$; f 为矿用电铲工作频率 $f = \frac{t}{T}$ 。

3.2 矿用电铲斗杆动态可靠性分析

斗杆各级载荷应力幅值及不同工况应力峰值的均值和标准差见表 3。

表 3 斗杆弯曲疲劳强度各随机变量均值和标准差
Table 3 Mean and standard deviation of random variables for the bending fatigue strength of the boom

参数	应力均值/MPa	应力标准差/MPa
S_1	12.5	0.125
S_2	37.5	0.375
S_3	62.5	0.625
S_4	87.5	0.875
S_5	112.5	1.125
S_6	137.5	1.375
S_7	162.5	1.625
S_{d1}	88.0	23.000
S_{d2}	113.0	13.000

注: $S_1 \sim S_7$ 指 1 到 7 级载荷; S_{d1} 和 S_{d2} 分别表示 70% 满斗率和 100% 满斗率的随机应力。

将 7 级等效应力幅值分别代入 $S-N$ 曲线求出各级应力下的相应寿命,再将各级应力与相应寿命代入式 (12) 计算,加载顺序随机排列,得到不同工况下矿用电铲斗杆剩余强度随时间变化曲线,如图 25 所示。可看出,斗杆弯曲疲劳剩余强度随服役时间的增长而逐渐降低,并且衰减速度逐渐加快,100% 满斗率工况下斗杆弯曲疲劳剩余强度的衰减速度明显

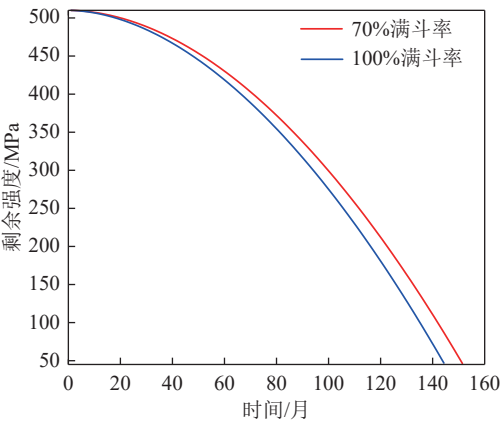


图 25 不同工况下矿用电铲斗杆弯曲疲劳剩余强度
Fig.25 Remaining bending fatigue strength of mining electric shovel bucket rod under different working conditions

更快。

基于上述分析,采用主动学习 Kriging 结合 Monte Carlo 模拟法的方法 (AK-MCS)^[28-29] 对本文所建立的极限状态函数进行可靠度计算,得到不同满斗率下矿用电铲斗杆弯曲疲劳可靠度随时间变化规律,如图 26 所示。不同工况下弯曲疲劳可靠度衰减趋势一致,均是先慢后快,但不同的是,受斗杆剩余强度退化速率影响,100% 满斗率工况下斗杆弯曲疲劳可靠度开始衰减时间更早、下降速度更快,在服役 120 个月后开始衰减,可靠度降为 0.995,第 127 个月衰减为 0.888,在第 135 个月衰减为 0.455,直至第 144 个月可靠度降为 0;而 75% 满斗率工况下斗杆弯曲疲劳可靠度在服役第 131 个月开始衰减,降为 0.996,第 139 个月衰减为 0.88,第 147 个月衰减为 0.464,直至第 155 个月可靠度降为 0。

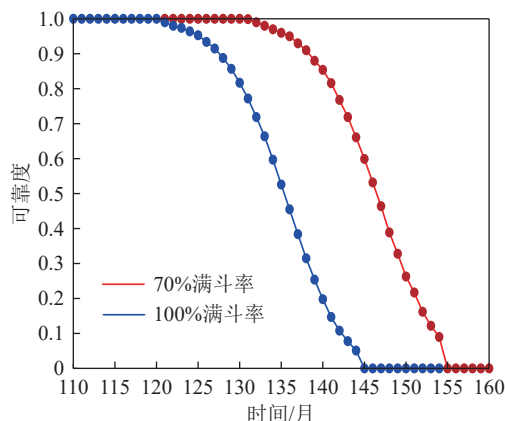


图 26 不同工况下矿用电铲斗杆弯曲疲劳可靠度

Fig.26 Reliability of bending fatigue of mining electric shovel bucket rod under different working conditions

根据获得的疲劳可靠性数据可采用阶段性预防策略^[30]对斗杆进行维护,依次在不同可靠度阶段内设置相应的维护次数,且不同阶段内的维护频率不同:

当 $0.91 \leq R \leq 1$ 时,可对斗杆低频次不完全性维护,使之能恢复良好的工作状态;当 $0.81 \leq R \leq 0.90$ 时,对其稍高频率维护;当 $0.51 \leq R \leq 0.80$ 时,对其进行更高频率、更全面的维护,并在斗杆劣化情况较为严重时对其完全性维护,如更换;当 $0 \leq R \leq 0.50$ 时,建议停机评估性能、更换零件,其中 R 为斗杆疲劳可靠度。

综上所述,可见基于矿用电铲不同满斗率工况能够对斗杆弯曲疲劳可靠度进行定性和定量的分析,为服役电铲的维护与更换提供了数据支撑,对工程实践具有指导意义。

4 结 论

1)矿用电铲工作装置在一个挖掘周期内负载动态变化,挖掘阶段负载先增大后减小,回转阶段负载缓慢增大,卸料后工作装置回到起始阶段负载降为 0;推压电机和提升电机匀速输出状态下,工作装置的负载和应力都存在波动。

2)基于 Schaff 非线性理论建立斗杆弯曲疲劳剩余强度模型,不同满斗率工况下剩余强度随服役时长增加而降低,100% 满斗率工况下降低速度更快。

3)建立了电铲斗杆弯曲疲劳可靠性模型,获得了斗杆弯曲疲劳可靠度随时间变化曲线,分析可靠性的变化趋势可知,不同工况下弯曲疲劳可靠度衰减速度变化趋势一致,均是先慢后快,但受剩余强度衰减速度影响,100% 满斗率工况下斗杆弯曲疲劳可靠度衰减时间更早、衰减速度更快,斗杆发生疲劳失效时间提前,不同工况下相同服役时长对应的维护策略阶段也不同。

参考文献(References):

- [1] 王国法,张建中,刘再斌,等. 煤炭绿色开发复杂巨系统数智化技术进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 1-16.
WANG Guofa, ZHANG Jianzhong, LIU Zaibin, et al. Progress in digital and intelligent technologies for complex giant systems in green coal development[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 1-16.
- [2] 冯彦彪,邵俊恺,杨珏,等. 矿用自卸车新能源技术研究现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 343-350.
FENG Yanbiao, SHAO Junkai, YANG Jue, et al. Research status and prospect of new energy technology of mine dump truck[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 343-350.
- [3] 付涛,张天赐,崔允浩,等. 深度学习增强的智能矿用电铲挖掘轨迹跟踪控制[J]. 机械工程学报, 2024, 60(16): 357-366.
FU Tao, ZHANG Tianci, CUI Yunhao, et al. Deep learning-enhanced intelligent electric shovel digging trajectory tracking control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(16): 357-366.
- [4] 高聚琼,杜建,王志远,等. 基于损伤演化机理的挖掘机工作装置疲劳寿命分析[J]. 煤矿机械, 2023, 44(11): 76-80.
GAO Juqiong, DU Jian, WANG Zhiyuan, et al. Fatigue life analysis of excavator working device based on damage evolution mechanism[J]. Coal Mine Machinery, 2023, 44(11): 76-80.
- [5] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 1-27.
WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 1-27.
- [6] 屈磊. 矿用电铲工作机构性能研究及优化[D]. 沈阳: 东北大学, 2020.

- QU Lei. Research and optimization of working mechanism of mining electric shovel[D]. Shenyang: Northeastern University, 2020.
- [7] 冯豪, 杜群贵, 于树栋. 液压挖掘机挖掘动力学建模研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(13): 242–248.
- FENG Hao, DU Qungui, YU Shudong. Digging dynamic modeling for hydraulic excavators[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(13): 242–248.
- [8] 秦威, 赵刚, 江志刚, 等. 液压挖掘机工作装置的载荷谱测试研究[J]. 机械设计与制造, 2018(3): 226–229.
- QIN Wei, ZHAO Gang, JIANG Zhigang, et al. Load spectrum test research on working device of hydraulic excavator[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(3): 226–229.
- [9] 张净华. 液压挖掘机工作装置有限元分析与焊接疲劳寿命预测[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- ZHANG Jinghua. Finite element analysis and welded fatigue life prediction of hydraulic excavator working device[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- [10] 万丽荣, 秦伟, 刘文婷, 等. 基于 EDEM-ADAMS 耦合的挖掘机动臂疲劳寿命分析[J]. 煤炭工程, 2024, 56(12): 176–184.
- WAN Lirong, QIN Wei, LIU Wenting, et al. Fatigue life analysis of excavator boom based on EDEM-ADAMS coupling[J]. Coal Engineering, 2024, 56(12): 176–184.
- [11] 刘菊蓉, 孙浩然, 梁杨, 等. 基于常态挖掘轨迹的铲斗疲劳寿命研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(21): 89–93.
- LIU Jurong, SUN Haoran, LIANG Yang, et al. Study on fatigue life of bucket based on normal mining trajectory[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(21): 89–93.
- [12] 刘广军, 刘可臻, 孙波, 等. 基于刚-柔耦合的反铲液压挖掘机工作装置多体动力学分析与仿真[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(7): 1053–1060.
- LIU Guangjun, LIU Kezhen, SUN Bo, et al. Multi-body dynamic analysis and simulation of backhoe hydraulic excavator working device based on rigid-flexible coupling[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(7): 1053–1060.
- [13] 刘畅, 黄笛, 曹超, 等. 基于 DEM-MBD 耦合的液压挖掘机动力学仿真分析[J]. 机床与液压, 2024, 52(5): 180–185.
- LIU Chang, HUANG Di, CAO Chao, et al. Dynamic simulation analysis of hydraulic excavator based on DEM-MBD coupling[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(5): 180–185.
- [14] 徐丹, 王基生. 挖掘机液压缸摩擦力对工作装置性能影响分析[J]. 机械设计与制造, 2014(4): 15–17, 20.
- XU Dan, WANG Jisheng. Excavator hydraulic cylinder friction performance impact analysis on the working device[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(4): 15–17, 20.
- [15] 赵子豪, 谢斌, 温昌凯, 等. 电动拖拉机双电机驱动系统模式切换瞬态特性与控制方法研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(4): 532–542.
- ZHAO Zihao, XIE Bin, WEN Changkai, et al. Transient characteristics and control methods of mode switching in electric tractor dual motor drive system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 532–542.
- [16] 李宏仲, 周玉龙. 考虑强度退化的海上风机齿轮结构可靠性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13): 5037–5049.
- LI Hongzhong, ZHOU Yulong. Reliability assessment method for offshore wind turbine gear structures considering strength degradation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(13): 5037–5049.
- [17] 周志刚, 徐芳. 考虑强度退化和失效相关性的风电齿轮传动系统动态可靠性分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(11): 80–87.
- ZHOU Zhigang, XU Fang. Dynamic reliability analysis of gear transmission system of wind turbine considering strength degradation and dependent failure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(11): 80–87.
- [18] 周志刚, 秦大同, 杨军, 等. 随机风载作用下风力发电机齿轮传动系统疲劳寿命预测[J]. 太阳能学报, 2014, 35(7): 1183–1190.
- ZHOU Zhigang, QIN Datong, YANG Jun, et al. Fatigue life prediction of gear transmission system of wind turbine under stochastic wind load[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2014, 35(7): 1183–1190.
- [19] 路志成, 周建星, 崔权维, 等. 基于动力学的风力机齿轮传动系统可靠性研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(9): 397–404.
- LU Zhicheng, ZHOU Jianxing, CUI Quanwei, et al. Research on reliability of gear transmission system of wind turbine based on dynamics[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(9): 397–404.
- [20] 宋礼睿, 崔权维, 周建星, 等. 风电齿轮箱高速轴轴承疲劳寿命及动态可靠性分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 437–444.
- SONG Lirui, CUI Quanwei, ZHOU Jianxing, et al. High speed bearing fatigue life and reliability analysis of wind turbine gearbox under random load[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(8): 437–444.
- [21] 屈衍静, 杨深然, 史妍妍, 等. 基于强度退化的齿轮可靠性计算模型研究及应用[J]. 航空发动机, 2017, 43(5): 35–38.
- QU Yanjing, YANG Shenran, SHI Yanyan, et al. Research and application on reliability calculation model of a gear based on strength reduction[J]. Aeroengine, 2017, 43(5): 35–38.
- [22] 高玉闪, 杨茂, 李斌, 等. 材料与载荷随机性影响下管路结构振动疲劳可靠性分析方法[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(11): 1–11.
- GAO Yushan, YANG Mao, LI Bin, et al. Study on the reliability analysis method for vibration fatigue of pipeline structures under the random influence of materials and loads[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(11): 1–11.
- [23] 秦涛, 李运华, 范茹军. 强力摇臂矿用液压挖掘机自主挖掘轨迹优化[J]. 机械工程学报, 2024, 60(18): 374–384.
- QIN Tao, LI Yunhua, FAN Rujun. Trajectory optimization of autonomous mining for powerful rocker arm hydraulic shovels[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(18): 374–384.
- [24] 王翔宇, 葛磊, 赵斌, 等. 液电混合驱动电铲提升系统能效特性研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 418–426.
- WANG Xiangyu, GE Lei, ZHAO Bin, et al. Energy efficiency characteristics of cable shovel lifting system driven by hydraulic-electric hybrid system[J]. Transactions of the Chinese Society for

- Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 418–426.
- [25] SCHAFF J R, DAVIDSON B D. Life prediction methodology for composite structures. part I: Constant amplitude and two-stress level fatigue[J]. *Journal of Composite Materials*, 1997, 31(2): 128–157.
- [26] BANDARA C S, SIRIWARDANE S C, DISSANAYAKE U I, et al. Developing a full range S–N curve and estimating cumulative fatigue damage of steel elements[J]. *Computational Materials Science*, 2015, 96: 96–101.
- [27] SHIN M S, PARK J H, KIM J Y. Study on effect of mean stress on fatigue life prediction of thin film structure[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(4): 1547–1554.
- [28] 张磊, 孙学涛, 陈洁, 等. 汽车结构可靠性分析与优化设计研究进展[J]. *中国机械工程*, 2024, 35(11): 1948–1962, 1970.
- ZHANG Lei, SUN Xuetao, CHEN Jie, et al. Research progresses on reliability analysis and optimal design of automobile structures[J]. *China Mechanical Engineering*, 2024, 35(11): 1948–1962, 1970.
- [29] 洪林雄, 李华聪, 彭凯, 等. 基于改进学习策略的 Kriging 模型结构可靠度算法[J]. *西北工业大学学报*, 2020, 38(2): 412–419.
- HONG Linxiong, LI Huacong, PENG Kai, et al. Structural reliability algorithms of Kriging model based on improved learning strategy[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2020, 38(2): 412–419.
- [30] 孙钰. 机械滚动轴承可靠运行剩余寿命预测及维修决策研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2020.
- SUN Yu. Research on remaining life prediction and maintenance decision making of mechanical rolling bearings in reliable operation[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2020.