

王斌华,向清怡,陈一馨,等. 挖掘机结构疲劳可靠性研究现状及展望[J]. 长安大学学报(自然科学版),2022,42(1):115-126.

WANG Bin-hua,XIANG Qing-yi,CHEN Yi-xin,et al. Fatigue reliability analysis of excavator structure:A state-of-the-art review and future research[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition),2022,42(1):115-126.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2022.01.007

挖掘机结构疲劳可靠性研究现状及展望

王斌华,向清怡,陈一馨,吕彭民

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

摘 要:目前中国已成为全球最大的挖掘机市场,有多家中国挖掘机制造企业进入全球挖掘机制造企业前 20 强。随着中国经济的迅猛发展和“一带一路”倡议的实施,可以预见,国内外工程建设对挖掘机的需求还有一定的增长点,“十四五”期间中国挖掘机制造企业会有更大的发展空间。统计数据表明,目前市场上小型挖掘机占比约 60%,中、大型挖掘机占比约 40%,其中外资品牌的中、大型挖掘机占比较高,超过 50%,中国挖掘机产品可靠性问题仍然是制约市场占比提高的因素之一。随着中国工程机械行业的快速发展,对工程机械产品的使用寿命和可靠性需求也越来越高,因此《工程机械行业“十四五”发展规划》中已把产品可靠性提升工程列入重点突破技术之一。为了提高挖掘机结构疲劳可靠性,基于本研究团队完成的《国家科技支撑计划——土方机械疲劳可靠性关键技术研究》项目,从挖掘机载荷谱测试与编制、疲劳寿命预测、可靠性分析方法等 3 个方面,研究了国内外挖掘机结构疲劳可靠性的研究现状、典型成果、存在问题、具体对策和发展趋势,指出应进一步推进典型焊接构造细节疲劳寿命曲线、台架疲劳试验、产品信息收集和试验数据积累等方面的学研合作工作,为挖掘机结构疲劳可靠性研究提供新的视角和基础资料。

关键词:机械工程;挖掘机;载荷谱;疲劳寿命;可靠性;台架试验;研究现状与展望

中图分类号:U415.51

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2022)01-0115-12

Fatigue reliability analysis of excavator structure: A state-of-the-art review and future research

WANG Bin-hua, XIANG Qing-yi, CHEN Yi-xin, LYU Peng-min

(Key Laboratory of Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Statistics show that China has become the largest excavator market in the world, and many domestic excavator manufacturers have entered the top 20 excavator manufacturers in the world. With the rapid development of China's economy, and "The Belt and Road" initiative will also bring about a certain growth in the demand for excavator equipment at home and abroad. Therefore, during the "14th Five-Year Plan" period, there will be greater development space for

收稿日期:2020-06-15

基金项目:国家科技支撑计划项目(2015BAF07B02);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JQ-282,2021JM-148);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102250101)

作者简介:王斌华(1979-),男,江西上饶人,教授,工学博士,博士后,E-mail:wangbh@chd.edu.cn。

通讯作者:吕彭民(1957-),男,陕西渭南人,教授,博士研究生导师,E-mail:lpmin@chd.edu.cn。

domestic excavator manufacturing enterprises. However, the existing statistics also show that small excavators account for about 60%, medium and large excavators account for about 40% in the market, of which the proportion of medium and large excavators of foreign brands is very high, more than 50%. The reliability of domestic excavators is still one of the factors restricting the increase of market share. With the rapid development of China's construction machinery industry, the demand for service life and reliability of construction machinery products will be higher and higher. Therefore, the "14th Five-Year Plan" for the development of construction machinery industry has listed the product reliability improvement project as one of the key breakthrough technologies. In order to improve the fatigue reliability of excavator structure which is one of the main types of construction machinery, it presents from three aspects, which are load spectrum test and compilation, fatigue life prediction method and reliability analysis method based on the research team's thinking of completing the 14th "Five-Year Plan"-National Science and Technology Support Plan of Research on Key Technologies of Fatigue Reliability of Earth Moving Machinery. The current state-of-the-art, typical achievements, existing problems, specific countermeasures and development trend in the domestic and abroad field of excavator were discussed. It is pointed out that the industry-university cooperation in the following aspects should be further promoted, including statistics of typical working conditions and operating medium types of excavators, fatigue life curves of typical welding structure details, bench fatigue test, product information collection and test data accumulation. This review article can provide a new perspective and basic data for the study of fatigue reliability of excavator structure. 6 figs, 74 refs.

Key words: mechanical engineering; excavator; load spectrum; fatigue life; reliability; bench test; state-of-the art

0 引言

2015 年国务院发布《中国制造 2025》是中国实施制造强国战略的行动纲领,提出了“创新驱动、质量为先、绿色发展、结构优化、人才为本”的基本方针,把质量作为建设制造强国的生命线,但是可靠性偏低是中国机械装备质量与国外先进水平的主要差距之一,因此,提高可靠性是制造业与制造装备的重要发展方向。

挖掘机是工程机械中从事土方工程施工的主要机械装备,广泛应用于建筑工程、道路工程、水利工程、矿山建设等领域,是重要的施工机械。挖掘机也是工程机械市场上极为重要的板块,决定了全球工程机械产业的格局,产业前四强都是依靠强大的挖掘机产业才成为领军者^[1]。在挖掘机市场上,主要的挖掘机生产企业包括欧、美、日、韩以及中国等。中国自 20 世纪 60 年代末开始研制生产挖掘机产品,近年来发展迅猛,涌现出三一重工、徐工机械、柳工、山东临工、山河智能、中联重科、山推股份等一大批具有国际竞争力的企业。2021 年 1~5 月,中国

26 家主要挖掘机制造企业共销售各类挖掘机 200 733 台,较 2020 年同期增长 37.7%,市场占比 88%,出口 23 998 台,较 2020 年同期增长 106%,市场占比 12%^[2],中国已成为全球最大的挖掘机市场。随着中国经济的迅猛发展以及“一带一路”倡议实施,可以预见国内外基础设施建设对挖掘机的需求还有一定的增长点。目前市场上小型挖掘机占比约 60%,中、大型挖掘机占比约 40%,其中外资品牌中、大型挖掘机的占比较高,超过 50%^[3]。挖掘机的可靠性问题仍然是制约中国产挖掘机市场占有率提高的主要影响因素之一。2021 年,中国工程机械工业协会正式发布的《工程机械行业“十四五”发展规划》中,明确把工程机械产品可靠性提升工程作为重点突破技术与产业化创新工程。

综上,中国工程机械行业挖掘机产品的快速发展,对其使用寿命和可靠性需求越来越高。作为可靠性技术中的关键零部件载荷谱、寿命预测和可靠性分析方法等共性技术对行业发展具有很大的促进作用,是挖掘机产品的产业升级、技术水平提升、核心竞争力增强的重要支撑。为此,本文针对上述问

题通过查阅分析相关文献,结合课题组研究成果,进行综合分析阐述。

1 挖掘机工作装置载荷谱

在挖掘机领域,国外公开的研究基本是针对工程实例中已经发生的结构件断裂现象进行失效原因分析或虚拟仿真模拟,鲜有实测结构所受的外载荷,也很少有从载荷谱编制、疲劳台架试验角度进行疲劳分析^[4-6],且载荷谱的相关研究文献较少。分析其主要原因可能是,载荷谱的编制原理和方法研究是疲劳研究领域的难题,而国际上载荷谱数据和编谱方法实施细则属于企业机密和知识产权保护范围。

加拿大 Yin 等以电驱动 BE-395B 正铲挖掘机为对象,研究其外载荷测试方法,如图 1 所示^[7]。首先,在转臂上 2 个无应力集中的横截面(截面 A-A、B-B)处布置沿转臂纵轴方向的单向应变片,测试截面应变分布,应变片布置见图 2,由测得的截面应变分布计算截面轴向拉力和弯矩;其次,对转臂、斗杆和铲斗进行受力分析,对各构件建立力学平衡方程,联立求解,间接获取转臂铰点力、吊缆拉力及斗尖力,该力-时间历程即为载荷谱编制的基础数据。文献^[7]为类似转臂结构的工程机械外载荷测量提供了有益思路。

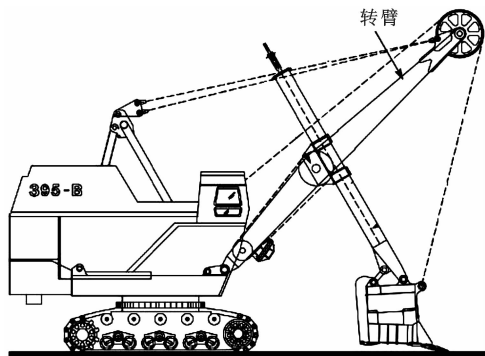
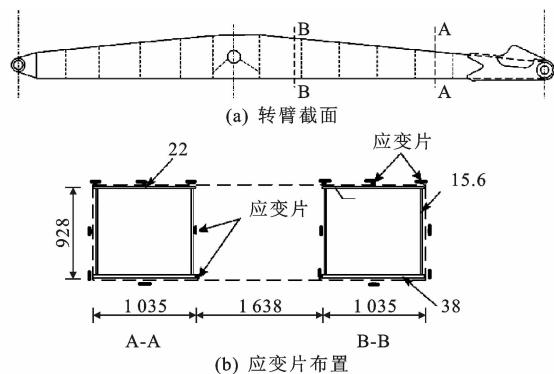


图 1 电驱动 BE-395B 正铲挖掘机^[7]

Fig. 1 Electrically driven BE-395B forward shovel excavator^[7]

卡特彼勒公司 Bae 等针对反铲液压挖掘机动臂的疲劳设计,提出一种基于工程数据分析(engineering data analytics, EDA)的技术,实现从实测应力-时间历程(布置在动臂的传感器采集信息)中提取疲劳设计载荷(fundamental fatigue load)的方法,以提取的载荷作为挖掘机动臂设计初期的外载荷,该方法比传统的经验设计更接近实际受载状态^[8]。

中国最早研究是由天津工程机械研究院在 1980~1983 年开展的,高月华等主要成果是编制了 R961 型液压挖掘机斗杆危险测点应力谱,并将应力



单位: mm

图 2 转臂截面应变片布置^[7]

Fig. 2 Strain gauge arrangement of boom section^[7]

谱转化得到 1 个确定当量姿态下的斗尖载荷谱;结合单斗液压挖掘机自身特点和载荷谱试验过程中的具体情况,针对载荷(应力)-时间历程的分段记录、频次的合成与扩展、样本长度确定等问题进行了研究^[9-10]。2013 年天津工程机械研究院刘志东等研究了实时测试挖掘机载荷方法,针对不同载荷,选用区别化的测试方案,设计易连接、可重复利用的信号采集系统,对挖掘机的 3 种典型工况(挖掘装载、行走和回转)进行了试验,并对试验结果进行分析,为载荷谱的编制工作奠定了良好的实测数据基础^[11]。较早的研究还有 1992 年石来德等对挖掘机工作装置在 1 个固定姿态下进行整机疲劳试验,使用的程序谱是由动臂上某危险点实测应力-时间历程转化的固定姿态下斗尖单向加载力编制的^[12]。此后,挖掘机工作装置疲劳载荷谱的研究很少,直到近 20 年,随着测试技术和计算机辅助工程(computer aided engineering, CAE)分析技术的发展,挖掘机工作装置的疲劳或相关载荷谱的研究才逐渐增多。张卫国等实测了某 6 t 小型挖掘机挖掘过程中,工作装置各油缸的位移和压力数据,反推出齿尖理论最大挖掘阻力,以齿尖挖掘阻力及各油缸位移变化曲线作为驱动参数,采用 ADAMS 软件仿真求得各铰点力,作为工作装置疲劳研究的输入载荷谱数据^[13]。滕毅敏对挖掘机工作装置进行了运动学和力学分析,并在此基础上对测点进行外部载荷的标定,用多元线性回归方法建立载荷回归方程,实现了实时应力测试向载荷测试的转变^[14]。姜涛等实测了某 20 t 中型挖掘机挖掘过程中各油缸的位移和压力数据,利用 D-H(Denavi-Hartenberg)方法建立挖掘机工作装置各构件动力学模型,求解获取了工作装置各铰点力^[15]。邱清盈等利用显示动力学软件 LS-DYNA 建立了某 23 t 中型挖掘机铲斗挖掘

土壤的仿真模型,得到了仿真挖掘阻力^[16]。杜敏杰等对某型号液压挖掘机进行现场测试试验,采集工作装置各油缸的压力和伸缩量,通过理论力学原理推导斗杆铰点力-时间历程,并将斗杆前端铰点水平和竖直方向的力编程序谱,进行双向加载,如图 3、图 4 所示^[17-19]。

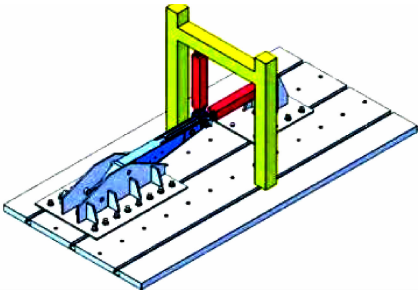


图 3 斗杆台架试验加载方案^[18]

Fig. 3 Bucket bar bench test loading scheme^[18]

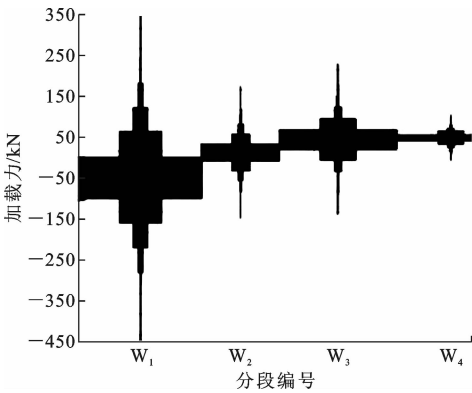


图 4 竖直方向力程序加载谱^[18]

Fig. 4 Vertical force program loading spectrum^[18]

另外,秦威等进行了某型号反铲液压挖掘机工作装置的载荷谱测试,测出挖掘机在挖掘过程中各个参数(液压缸位移以及推力大小)的变化情况,将计算得到的铲斗齿尖最大挖掘阻力和测试得到的各液压缸位移作为输入;采用 ADMAS 软件模拟仿真挖掘过程,进而得到挖掘机主要铰点的受力变化曲线,为工作装置进行疲劳寿命研究以及轻量化设计提供了载荷谱;应用 ADAMS 与 ABAQUS 软件联合仿真得到动臂结构上各节点应力谱,实现对动臂的疲劳寿命预测^[20]。

周利东等为了研究挖掘机斗杆的动态应力-应变特性,利用实际工况下现场实测油缸的数据导入有限元模型,获得斗杆与挖斗铰点处垂直和水平等效载荷历程,并在设计的水平和竖直联合加载工装台上进行加载,如图 5 所示,对比结果表明,挖土工况下,工装台模拟加载测试与有限元仿真结果吻合,但与现场实测数据有一定差异^[21]。

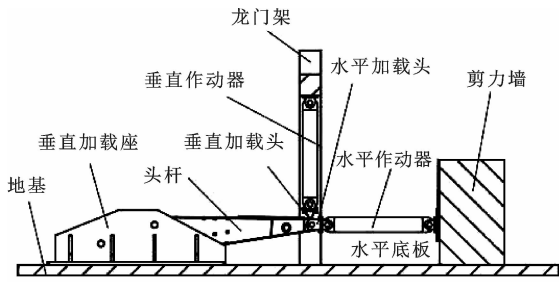


图 5 工装台模拟加载系统^[21]

Fig. 5 Simulation loading system of tooling table^[21]

李文玉等为了快速准确识别挖掘机等工程机械的工作载荷谱,基于时域内动应变响应与载荷的关系,提出一种新的工作载荷谱识别方法:在动臂和斗杆结构上分别选择 7 个基底测点实测应变谱,基于测点实测应变与测点单位载荷数值模拟应变结果,建立结构响应与载荷的关系,通过求解以工作载荷为未知量、基底矩阵和实测应变组为已知量的线性方程组得到工作载荷谱^[22]。但该方法使用动臂测点与使用斗杆测点决定的等效载荷谱有所不同,且未说明有限元模型确定的工作姿态(图 6)的选取依据,以及其与实测应变时工作装置多姿态之间的有效对应关系。



图 6 整机静力学数值模型^[22]

Fig. 6 Static numerical model of whole machine^[22]

总的来说,近年来针对挖掘机工作装置载荷谱测试的研究,基本都是基于平面假设的理论,利用实测的油缸压力和位移作为已知数据,或将其当作驱动参数,通过动力学仿真软件求解工作装置各铰点力,或将其代入力学平衡方程求解工作装置各铰点力,这类方法是建立在工作装置不受侧载和偏载影响的假设前提下。针对挖掘机工作装置载荷谱编制的研究,一种方法是直接编制结构危险测点的应力谱,再利用加载力与测点应力的关系,等效求出加载谱,但这种加载谱只能复现斗杆^[9]或动臂^[12]上 1 个危险点的应力状态,不能确定其余部位的应力是否与实际一致;此外,不同机型工作装置危险点的位置会因细部结构的差异而不同,以试验样机危险点的应力为中间量的等效斗尖加载谱很难推广至其他机型使用。另一种方法是直接将铰点载荷分力分别编程序谱,进行双向加载,但将各铰点力分别编制载

荷谱过程中,雨流计数后 2 个载荷的相位已不同相,导致各力之间的关联特性已无法再现。

综上可知,液压挖掘机工作装置实际工况下的载荷谱测试、编制及应用研究并不完善,仍有一定的局限性,主要表现在:①主要关注正载,对实际作业过程中受到的偏载、侧载不能完全测取,因而也就无法对其影响程度进行量化分析;②载荷谱测试试验选取的典型作业介质类型不全面,各介质类型权重系数设置依据不足,导致编制的载荷谱不具有广泛代表性;③现有的测试方法受试验样机结构细节的影响,编制的载荷谱难以推广至不同品牌和不同型号,不具备通用性;④不能充分考虑台架疲劳试验可行性和有效性。此外,载荷谱的测试编制也没有相关标准可以参考,这方面的研究十分欠缺。工作装置载荷谱关键技术研究的滞后,严重制约着中国挖掘机产品可靠性和国际市场竞争力的提升。

长安大学吕彭民等基于《国家科技支撑计划——土方机械疲劳可靠性关键技术研究》项目,联合徐州工程机械研究院和山河智能股份有限公司,以市场上常见的大、中型液压挖掘机中的 2 种典型机型为对象,开展了载荷谱测试方法、工作装置关键部件载荷谱编制方法、台架试验方法以及基于载荷谱和台架试验的疲劳强度评价方法等关键技术研究^[23]。主要研究成果如下。

(1)载荷谱测试。首先,采用问卷调查方式,进行了大量的大、中型挖掘机作业介质调研^[24],主要调研内容为挖掘机的作业介质种类及其对应的权重系数,通过对调研数据的统计分析,并结合载荷谱采集试验现场物料情况,最后确定大型挖掘机的工作介质分类(权重系数)为黏土(18.44%)、重黏土(42.68%)、密实硬土(38.88%);中型挖掘机的工作介质分类(权重系数)为松散土(24.6%)、亚黏土(22.6%)、黏土(24.1%)、含石块的重黏土(28.7%),为编制典型的、具有代表性的载荷谱提供了基础数据;其次,提出了 3 种工作装置载荷谱测试方法,基于自主研发的三维力销轴传感器^[25]的载荷谱测试方法、截面应力测试法^[26-27](斗杆截面应力测试法和动臂截面应力测试法)和油缸力法,前 2 种方法可以测得工作装置包括侧载和偏载在内的全部载荷情况,实测试验数据验证了所采用方法的有效性^[28]。

(2)载荷编制和台架试验。首先,提出挖掘机动臂、斗杆构件在各自的局部坐标系下进行台架疲劳试验的加载方案,成功解决了固定姿态下疲劳试验

无法反映实际载荷的技术难题,并且以动臂、斗杆最大弯矩截面作为载荷等效基准,实现了各铰点力等效为固定姿态下的单向试验载荷,使室内台架载荷谱疲劳试验加载成为可能,有效简化了动臂和斗杆疲劳寿命预估载荷谱、疲劳试验载荷谱和台架疲劳试验^[29]。其次,结合工程机械液压驱动特点,通过峰值值抽取、雨流循环计数、多种作业介质载荷谱合成、考虑液压系统溢流泄压情况的载荷外推等步骤,获得大、中型挖掘机动臂、斗杆的变均值一维程序载荷谱,并采用损伤一致性准则及损伤等效原理编制了台架疲劳试验加速载荷谱,对载荷谱进行量纲一化,使其能够在行业推广使用^[23]。

载荷谱是结构疲劳可靠性设计的基础数据,对于作业工况恶劣、结构复杂的工程机械产品,后续挖掘机载荷谱研究可从以下几方面开展:

(1)研究挖掘机工作装置的外载荷动态识别方法,开发结构更可靠、精度更高、信号传输更稳定、安装更简便的多信息同步采集专用传感器,实时测试挖掘机在不同恶劣环境下工作时的正载、偏载、侧载等全部载荷情况。

(2)探讨能复现动臂或斗杆构件上更多疲劳关键点损伤状态的载荷等效方法,为台架疲劳试验和疲劳寿命提供更加可靠的载荷数据。

(3)细化载荷谱编制过程中关键步骤的关键技术,如随机大幅值、大梯度载荷信号预处理时奇异信号的剔除,均幅值混合分布,小载荷剔除准则,多工况载荷谱合成与扩展,载荷加载顺序的影响等。

(4)结合计算机技术,引进智能算法,增强数据的使用范围和载荷谱的可靠性。

2 挖掘机工作装置疲劳寿命预测方法

在挖掘机寿命预测方面,国内外学者也进行了一些研究。Rusinski 等分析了斗轮挖掘机的斗轮、支座横拉板与耳板末端连接处破坏的原因^[30-32]。高振方等对单斗液压挖掘机进行了试验测试,开展了工作载荷谱的数据采集及处理方法研究^[10]。刘长虹等以 WK-10 挖掘机斗杆为研究对象,将模糊论和概率断裂力学理论相结合提出了估算疲劳寿命的公式,并对 2 种不同材料的斗杆进行疲劳失效概率计算^[33]。Park 对 3 种工作姿态下挖掘机的动臂油缸和动臂铰点受力开展了多体动力学分析,对动臂结构底板上易发生疲劳失效的横隔板焊接接头进行了应力分析,给出了优化后的动臂结构,并进行了疲劳寿命评估^[34]。张卫国等基于实测载荷-时间历

程,对 6 t 小型液压挖掘机进行了疲劳寿命研究^[13]。苏琦利用 MSC. fatigue 软件对 SWE470 中型挖掘机动臂疲劳寿命进行了预测^[35]。李泽军等为了对挖掘机工作装置焊接部位的疲劳寿命进行预测,分别采用国际焊接协会(IIW)标准和英国的钢结构(BS)标准评估挖掘机工作装置的疲劳寿命^[36-37]。童水光等基于灰色理论 GM(1,1)建立了挖掘机工作装置的疲劳寿命预测模型^[38]。谢玉婷等采用 ABAQUS 软件对液压挖掘机工作装置进行了应力-应变模拟,再结合 FE-SAFE 软件进行了疲劳寿命评估^[39]。崔跃玉利用 nCode-Design Life 软件对挖掘机动臂进行了疲劳寿命仿真模拟,获得了动臂的疲劳寿命^[40]。朱建新等以挖掘机动臂为研究对象,针对其所受载荷的随机性和复杂性导致疲劳寿命较难预测的问题,提出了基于仿真载荷谱的疲劳寿命分析方法,利用 Miner 准则对动臂进行疲劳寿命预测,并对影响疲劳寿命敏感度的关键参数进行分析,发现载荷幅值、缺口系数、表面质量系数和尺寸系数对疲劳寿命有显著影响^[41]。

综上可知:现有理论对挖掘机工作装置疲劳寿命分析预测的研究方法主要是利用仿真虚拟技术或理论分析方法,这些研究与试验存在偏差,未能基于实测试验数据与理论计算值进行系统性的比对分析,也未能形成相应的标准体系来指导挖掘机的生产与性能优化;在有限元建模方面,建模精度不足且忽略了结构焊缝等可能带来的影响,导致计算模型与实际性能存在一定差异;用于疲劳寿命分析的载荷信息与挖掘机实际工作状态也存在较大出入,不能真实地反映挖掘机工作受载状况。

Yin 等以存在疲劳开裂的挖掘机动臂为研究对象,利用现场测试获得载荷谱,通过有限元模拟计算相应的应力-应变时间历程,基于 Miner 线性累积损伤规律和裂纹扩展速率试验,对正铲挖掘机动臂进行了疲劳寿命研究^[42]。姜涛等提出一种真实载荷驱动的挖掘机工作装置疲劳寿命研究方法,通过真实载荷实测了某 20 t 中型挖掘机挖掘过程中各油缸的位移和压力数据,并利用 D-H(Denavit-Hartenberg)法建立挖掘机工作装置各构件动力学模型,求解获取工作装置各铰点力并进行各结构构件疲劳分析^[15]。曾宪任通过实测挖掘力以及有限元分析表明,静载条件的结构较安全,通过裂纹金相检查获知其开裂原因为焊接内应力与工况疲劳应力的双重叠加效应^[43]。程珩等通过工作装置薄弱部分的载荷历程,估算了各测点的疲劳寿命^[44]。张净

华以某中型液压挖掘机工作装置为研究对象,对 4 种作业工况下挖掘机的挖掘力和挖掘阻力进行了理论分析计算,建立了相关数学模型,并通过 SolidWORKS、ANSYS、ADAMS 等软件的联合仿真分析获取工作装置任意点的应力-时间历程,最后基于英国的钢结构(BS)标准和国际焊接协会(IIW)标准,结合 Miner 线性累积损伤理论,计算了工作装置关键焊接位置的疲劳寿命^[45]。张业祥通过对材料的 S-N 曲线(S 为应力,N 为循环次数)修正得到结构的 S-N 曲线,并结合雨流计数法和 Miner 线性累积损伤理论对反铲液压挖掘机工作装置各结构的疲劳寿命进行了计算^[46]。

吕彭民教授团队也开展了系统性研究。盛亚君等利用 ANSYS 软件分析工作装置的静态力学,确定实测疲劳应力关键点,根据实测数据信号分析应力谱,编制载荷谱,并基于 Miner 疲劳损伤理论估算挖掘机动臂的疲劳损伤和寿命^[47-48]。李申申根据大型液压挖掘机的工作特点及相关文献,确定了 7 种典型的作业姿态,计算了各姿态下铲斗挖掘时理论挖掘力及可能受到的侧向力,建立了大型液压挖掘机工作装置的有限元模型;并对 7 种典型作业姿态进行了静强度分析,根据有限元分析结果及挖掘机实际工作中容易破坏的位置,确定了动态测试试验中应力测点,基于实测数据对各测点位置进行了寿命预估,并分析了回转惯性力对挖掘机工作装置动强度的影响^[49]。王宝刚等基于线性累积损伤理论,对液压挖掘机下车架疲劳关键部位进行了疲劳累积损伤计算,得到了中型挖掘机下车架疲劳关键部位疲劳寿命预测值,并与试验值进行比对,验证了方法的可行性^[50-51]。Wang 等为研究中型挖掘机动臂焊接结构开裂原因,采用 ANSYS 有限元软件建立了动臂有限元模型,获得其在疲劳载荷谱下的应力分布,并利用精细子模型建模技术,获得厚板焊缝构造在不同板厚位置的热点应力,根据国际焊接协会(IIW)标准评估焊接结构的疲劳寿命,仿真结果揭示了疲劳试验时焊缝开裂成因^[52]。赵鹏华运用坐标转换建立局部坐标系,通过油缸力法完成各构件的载荷求解,利用 ANSYS 软件对铲斗结构进行有限元计算,确定其应力分布以及大应力位置,并求出铲斗各载荷与最大应力点处的力与应力之间的传递系数,通过名义应力法计算了铲斗大应力位置的疲劳寿命^[53]。向清怡以中型挖掘机斗杆为例,借助 nCode-Design Life 软件,进行等效垂向载荷随机谱和加速台架疲劳试验程序谱下的疲劳寿命预测,

并基于 4 种常用国际标准,对台架疲劳试验中动臂和斗杆的疲劳破坏结构进行寿命预测,给出该关键部件疲劳强度评价的推荐方法^[54]。Zhu 等以某大型液压挖掘机动臂为研究对象,针对动臂根部腹板对接焊缝位置,采用热点应力法对该部位进行疲劳寿命评估指出,理论预测寿命与台架疲劳试验部位出现裂纹时的等效寿命相一致^[55]。习艳会^[56]、线晨^[57]分别开发了挖掘机专用疲劳分析软件。吕彭民等基于挖掘机整机及关键零部件的疲劳试验、载荷谱整理方法研究、疲劳寿命及可靠度评估等工作,主持撰写了团体标准《挖掘机载荷谱试验方法》(T/CCMA 0074—2019)^[58]、《挖掘机斗杆疲劳寿命试验方法》(T/CCMA 0073—2019)^[59]和《挖掘机动臂疲劳寿命试验方法》(T/CCMA 0072—2019)^[60]。上述研究成果有助于挖掘机由静态设计向动态设计和抗疲劳设计转变。疲劳可靠性试验标准的发布,完善了该领域缺乏标准的现状,便于相关企业进行整机改造、局部结构优化及新产品研制,使其关键零部件及整机使用寿命得到有效提高。

综上可知,挖掘机疲劳寿命预测方面,国内外学者对挖掘机关键零部件及整机的疲劳寿命试验、疲劳强度评估及寿命预测等进行了系统研究,但仍存在一些问题,后续可进一步开展如下研究。

(1)用于疲劳寿命评估的 $S-N$ 曲线,大多参考英国的钢结构(BS)标准、欧洲(EN)标准和国际焊接协会(IIW)标准,或将材料 $S-N$ 曲线修正得到结构的 $S-N$ 曲线,因为实际挖掘机工作装置焊接细部构造复杂或受力状态与上述标准等有一定差别,导致寿命评估精度受限;后续应进一步开展焊接细部构造的疲劳试验,从而获得相应结构的 $S-N$ 曲线,研究疲劳破坏的机理和提高疲劳寿命预测的准确度,为挖掘机的结构设计、保养、维修等提供数据支撑。

(2)挖掘机施工过程中,受工作介质、工作环境、外载荷及操纵员操作习惯等诸多因素影响,部分关键结构件承受多轴应力状态,现在研究大多将其简化为单轴应力状态进行寿命评估,未全面考虑复杂应力状态的影响,后续研究应结合试验测试数据开展多轴疲劳寿命评估。

3 挖掘机工作装置可靠性

对于挖掘机工作装置的疲劳可靠性,国内外学者进行了一系列相关研究。Altamura 等对土方机械的油缸缸体结构进行了疲劳可靠性分析,研究了

缸体表面初始缺陷和断裂韧性的随机特性,采用蒙特卡洛法建立了疲劳寿命预测模型^[61]。Danicic 等从结构设计、制造、工况条件、焊接质量等方面分析了矿用斗轮式挖掘机凸耳构件疲劳断裂机理,指出合理的设备管养计划对延长使用寿命和减少经济损失具有重要意义^[62]。王西峰等基于中国自主研发的 10 m^3 大型挖掘机运行状况的调研统计,建立与挖掘机功能系统相对应的可靠性模型,分析现场收集可靠性基本数据的合理方法,并以研究结果分析计算 10 m^3 挖掘机的使用可靠性^[63]。杜林基于有限元分析,采用神经网络响应面法评估挖掘机动臂结构危险点的可靠度^[64]。杨谋存等针对可靠性评价现场数据的模糊性、关联性和不一致性,构建了可靠性评价指标体系,分析了指标间的交互作用,探讨了基于 F2OMCDM(基于三角模糊数、模糊测度和有序加权平均算子的混合多指标评价方法)的在役液压挖掘机可靠性评价方法^[65]。胡天松基于故障维修数据对矿用大型挖掘机进行了可靠性评估,完成了电气系统和机械系统的可靠性分配^[66]。邢举学通过 ADAMS 和 ANSYS 软件对挖掘机斗杆进行运动学和动力学仿真,获取危险点应力-时间历程,采用 nCode-Design Life 软件根据累积损伤理论计算斗杆可靠度^[67]。然而,上述研究未进行可靠性试验,对结构件的疲劳寿命没有可信的可靠度指标供工程借鉴,只是通过仿真或主观判断评价挖掘机结构的可靠性。

2018 年颁布的中国标准《土方机械 液压挖掘机 可靠性试验方法、失效分类及评定》(GB/T 36693—2018),规定了液压挖掘机整机在符合标准的试验场地或实际工地上进行规定时长的可靠性试验的方法和规则,以及失效分类及评定方法。

国家工程机械质量监督检验中心的杨朕等采用随机抽样法,采集了 760 台液压挖掘机在 400、800 h 的现场跟踪可靠性试验信息(主要包括动力系统、传动系统、执行系统-工作装置、行走系统、回转系统、制动系统、控制系统、电气系统、其他主要零部件等 9 大系统),统计故障发生时间、发生部位和发生次数,进行了故障模式、故障分布等的可靠性数据分析;指出中国迫切需要制定多样本液压挖掘机可靠性试验的国家、行业标准;采用统计学的相关指标和评价方法,规范和提升中国液压挖掘机可靠性试验及验证水平,对故障进行有效识别和系统分析,为提升中国液压挖掘机可靠性水平奠定了基础^[68]。厉娜等针对某中型挖掘机工作装置铰链机构频繁出现

问题,导致整机无法工作的现象,从设计角度出发,利用六西格玛 DMADV 模式,提升了铰链机构的可靠性^[69]。侯文峰以中国某大型挖掘机回转平台为例,分析了转台主要故障类型、故障发生部位以及故障发生时间段,并对转台主要零件和焊缝进行故障模式与影响分析(fault mode and effects analysis, FMEA)分析,采取相应措施降低了主要零件和焊缝的风险优先数(RPN)值;对该机型转台发生频率最高、影响恶劣的故障进行了故障树分析(fault tree analysis, FAT)分析,通过分析故障树的最小割集,制定了降低该故障的改进方案,并对改进方案进行了验证^[70]。

综上所述,针对结构形式多样、载荷工况复杂的挖掘机工作装置,其疲劳失效位置多发生在焊接区,已引起学者广泛关注,但挖掘机工作装置疲劳可靠性研究仍处于探索阶段。另外,对于高可靠性、大成本的研究对象,尤其在新产品初期,一般是样本容量的小样本问题^[71],缺乏经验数据,此时如何进行产品的可靠性评估仍值得深入研究。

吕彭民教授团队对大、中型挖掘机动臂、斗杆构件进行了可靠性试验研究,研发了同时适用于挖掘机动臂和斗杆的自平衡式疲劳试验台架^[72],开展了 4 套动臂和斗杆构件的室内台架疲劳可靠性定时截尾试验(定时截尾试验寿命 10 000 h)^[23],取每套动臂和斗杆寿命最短作为该工作装置的疲劳寿命,但挖掘机工作装置造价较高,且受试验成本及时间的限制,课题组只完成了 4 套挖掘机工作装置的疲劳寿命试验;基于试验结果,建立了基于极小样本定时截尾试验的挖掘机工作装置疲劳可靠性模型,研究了截尾数据对寿命分布模型参数估计的显著影响,同时对比分析了不同样本容量时多种定时截尾参数估计方法的精确度。定时截尾数据利用截尾未失效的样本信息,一定程度扩大了样本容量;同时,分别将虚拟增广样本法与 Bootstrap 方法相结合^[73]、Monte-Carlo 法和 Bayes 方法相结合^[74],建立了寿命服从对数正态分布和威布尔分布的极小样本挖掘机工作装置疲劳可靠性模型,并对比分析 2 种模型的适用性,得到了极小样本试验数据下挖掘机工作装置的疲劳寿命可靠性分析的推荐方法。

小样本可靠性问题对节约试验费用、缩短研发周期等具有重要意义。目前小样本可靠性评估技术是航空、航天及重大装备制造技术的重要研究方法。中国现有研究中仍然缺少挖掘机工作装置实物疲劳寿命试验和疲劳寿命可靠性评估的相关研究,因此

进一步开展挖掘机工作装置小样本疲劳寿命试验和可靠性评估方法研究具有重要工程价值和现实意义,可以从以下几方面开展研究:

(1)基于随机因素的结构疲劳可靠性评估,研究不同随机因素,如结构几何尺寸、材料属性、焊接工艺参数等对挖掘机工作装置疲劳寿命的影响,进一步完善工作装置结构疲劳可靠性评估。

(2)从性能退化角度,进行挖掘机工作装置结构强度退化的渐变可靠性及可靠性灵敏度分析。

(3)小样本可靠性分析的难点在于试验数据量太少,应充分收集设计、研制、试验、售后等多方面的信息,以及综合利用多种来源的先验信息,应用到统计推断中,不断提高小样本的可靠性评估精度。

4 结 语

(1)从文献研究的现状来看,目前关于挖掘机结构载荷谱测试、疲劳寿命预测、疲劳可靠性分析方法等,虽然已陆续产生了一些有价值的成果,但是相对汽车、机车车辆、航空航天装备等,其研究工作的深度和广度仍然不足。

(2)挖掘机典型作业工况和作业介质统计、典型焊接构造细节疲劳寿命曲线、台架疲劳试验、产品信息收集和试验数据积累等,这些研究工作的推进,将积极推动中国工程机械由生产大国向制造强国的转变。

参考文献:

References:

- [1] 朱 萍. 2020 年中国挖掘机产销量全球占比或突破 70%, 工程机械行业全球格局发生变化[E/OL]. (2020-11-25)[2021-10-19]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1684333284891429179&wfr=spider&for=pc>. ZHU Ping. In 2020, China's excavator production and sales in the world may break through 70%, the global pattern of construction machinery industry has changed [E/OL]. (2020-11-25)[2021-10-19]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1684333284891429179&wfr=spider&for=pc>.
- [2] 前瞻经纪人. 2021 年中国挖掘机行业市场现状与市场销售情况分析——出口市场增长强劲[E/OL]. (2021-06-23)[2021-10-19]. <https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/210623-82396b56.html>. Forward-The Economist. Market status and sales analysis of China excavator industry in 2021: Strong growth of export market [E/OL]. (2021-06-23)[2021-10-19]. <https://www.qianzhan.com/analyst/>

- detail/220/210623-82396b56. html.
- [3] 高 建. 2020 年中国挖掘机全球占比或突破 70% 成为全球最大挖掘机市场 [E/OL]. (2020-11-27) [2021-10-19]. <https://www.chyxx.com/news/2020/1127/912507.html>.
GAO Jian. In 2020, the global proportion of Chinese excavators may break through 70% and become the world's largest excavator market [E/OL]. (2020-11-27) [2021-10-19]. <https://www.chyxx.com/news/2020/1127/912507.html>.
- [4] DAYAWANSA P, CHITTY G, KEREZSI B, et al. Fracture mechanics of mining dragline booms[J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13(4): 716-725.
- [5] FRIMPONG S, LI Y. Stress loading of the cable shovel boom under in situ digging conditions[J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(4): 702-715.
- [6] RUSINSKI E, MOCZKO P, CZMOCHOWSKI J. Numerical and experimental analysis of a mine's loader boom crack[J]. Automation in Construction, 2008, 17(3): 271-277.
- [7] YIN Y, GRONDIN G Y, OBAIA K H, et al. Fatigue life prediction of heavy mining equipment. Part 1: Fatigue load assessment and crack growth rate tests[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(11): 1494-1505.
- [8] BAE H R, ANDO H, NAM S, et al. Fatigue design load identification using engineering data analytics[J]. Journal of Mechanical Design, 2015, 137(1): 011001.
- [9] 高月华, 高振方, 秦淑华. R961 型液压挖掘机斗杆载荷谱[J]. 工程机械, 1980, 11(9): 32-38.
GAO Yue-hua, GAO Zhen-fang, QIN Shu-hua. Load spectrum of R961 hydraulic excavator's stick[J]. Construction Machinery and Equipment, 1980, 11(9): 32-38.
- [10] 高振方, 秦淑华. 单斗液压挖掘机工作载荷谱的数据采集及处理方法[J]. 工程机械, 1983, 14(10): 22-26, 31.
GAO Zhen-fang, QIN Shu-hua. Collection and processing method of load spectrum data of single bucket hydraulic excavator[J]. Construction Machinery and Equipment, 1983, 14(10): 22-26, 31.
- [11] 刘志东, 李莺莺, 杨清淞, 等. 挖掘机液压系统载荷数据测试方法研究[J]. 工程机械, 2013, 44(3): 18-25, 93.
LIU Zhi-dong, LI Ying-ying, YANG Qing-song, et al. Research of method to test load data of excavator hydraulic system [J]. Construction Machinery and Equipment, 2013, 44(3): 18-25, 93.
- [12] 石来德, 曹善华, 俞丽萍. 单斗液压挖掘机模型模拟试验加载谱的研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1992, 20(4): 395-402.
SHI Lai-de, CAO Shan-hua, YU Li-ping. The study of loading spectrum of model test for hydraulic excavator [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 1992, 20(4): 395-402.
- [13] 张卫国, 权 龙, 程 珩, 等. 真实载荷驱动下挖掘机工作装置疲劳寿命研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 35-38, 105.
ZHANG Wei-guo, QUAN Long, CHENG Hang, et al. Fatigue analysis on working device of excavator driven by practical load [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 35-38, 105.
- [14] 滕毅敏. 挖掘机工作装置的载荷谱测试研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
TENG Yi-min. Study on load spectrum test of excavator [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [15] 姜 涛, 刘雄斌, 周广萍. 实测载荷驱动下挖掘机动臂的疲劳寿命研究[J]. 中国工程机械学报, 2014, 12(3): 268-272.
JIANG Tao, LIU Xiong-bin, ZHOU Guang-ping. Fatigue life study on excavator booms under actual loading [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2014, 12(3): 268-272.
- [16] 邱清盈, 魏振凯, 高 宇, 等. 挖掘机工作装置疲劳分析方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(1): 159-165.
QIU Qing-ying, WEI Zhen-kai, GAO Yu, et al. Fatigue analysis method of working devices of hydraulic excavator [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(1): 159-165.
- [17] 杜敏杰, 黄 雪, 李 隽, 等. 挖掘机斗杆载荷谱测试方法及其数据处理[J]. 锻压技术, 2017, 42(8): 107-114.
DU Min-jie, HUANG Xue, LI Jun, et al. Test method and data processing for load spectrum of excavator bucket rod [J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42(8): 107-114.
- [18] 杜敏杰, 黄 雪, 杨前进, 等. 基于雨流频次外推的液压挖掘机斗杆程序载荷谱编制[J]. 机械设计, 2019, 36(6): 87-93.
DU Min-jie, HUANG Xue, YANG Qian-jin, et al. Program load-spectrum compiling of the hydraulic excavator's bucket rod based on the rain-flow frequency extrapolation [J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(6): 87-93.
- [19] 杜敏杰. 基于载荷谱的挖掘机斗杆疲劳寿命预测研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2018.

- DU Min-jie. Study on fatigue life prediction of excavator stick based on load spectrum[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2018.
- [20] 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 Zhi-gang, et al. Load spectrum test research on working device of hydraulic excavator[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(3): 226-229.
- [21] 周利东, 韩亮亮, 王雷, 等. 挖掘机斗杆模拟加载试验研究[J]. 机械设计, 2020, 37(1): 110-115.
- ZHOU Li-dong, HAN Liang-liang, WANG Lei, et al. Study on the loading test of the excavator's bucket arm[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(1): 110-115.
- [22] 李文玉, 夏日, 许金泉. 挖掘机工作载荷谱识别方法研究[J]. 力学季刊, 2021, 42(1): 130-139.
- LI Wen-yu, XIA Ri, XU Jin-quan. Research on identification method of working load spectrum for excavator[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2021, 42(1): 130-139.
- [23] 吕彭民, 陈一馨. 液压挖掘机工作装置疲劳可靠性[M]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- LU Peng-min, CHEN Yi-xin. Fatigue reliability of hydraulic excavator working device[M]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [24] 陈一馨, 刘永生, 吕彭民. 挖掘机载荷谱试验的作业介质及作业类型[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(12): 117-122.
- CHEN Yi-xin, LIU Yong-sheng, LU Peng-min. Operation medium and type of load spectrum test of excavator[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2018, 35(12): 117-122.
- [25] 郁录平, 路宇, 向岳山, 等. 液压挖掘机铲斗载荷的测试方法[J]. 中国工程机械学报, 2016, 14(3): 267-270.
- YU Lu-ping, LU Yu, XIANG Yue-shan, et al. Testing method for bucket loading of hydraulic excavators[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2016, 14(3): 267-270.
- [26] XIANG Q Y, LU P M, WANG B H. Identification of cross-section loads for steel beam with simple cross-sectional shape based on measured strain and its application[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(12): 5017-5028.
- [27] 向清怡, 吕彭民, 王斌华, 等. 液压挖掘机工作装置载荷谱测试方法[J]. 中国公路学报, 2017, 30(9): 151-158.
- XIANG Qing-yi, LU Peng-min, WANG Bin-hua, et al. Load spectrum test method of hydraulic excavator working device[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(9): 151-158.
- [28] 向清怡, 吕彭民, 王斌华, 等. 液压挖掘机工作装置铰点实测载荷特征研究[J]. 机械强度, 2018, 40(5): 1063-1070.
- XIANG Qing-yi, LU Peng-min, WANG Bin-hua, et al. Research on characteristics of actual hinge joint load of hydraulic excavator working device[J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40(5): 1063-1070.
- [29] 向清怡, 吕彭民, 王斌华, 等. 液压挖掘机斗杆台架疲劳试验载荷等效方法[J]. 中国公路学报, 2018, 31(6): 317-326.
- XIANG Qing-yi, LU Peng-min, WANG Bin-hua, et al. Load equivalent method for fatigue bench test of hydraulic excavator stick[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(6): 317-326.
- [30] RUSINSKI E, HARNATKIEWICZ P, KOWALCZYK M, et al. Examination of the causes of a bucket wheel fracture in a bucket wheel excavator[J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(6): 1300-1312.
- [31] FRIMPONG S, HU Y. Parametric simulation of shovel-oil sands interactions during excavation[J]. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 2004, 18(3): 205-219.
- [32] BOSNJAK S, PETKOVIC Z, ZRNIC N, et al. Failure analysis and redesign of the bucket wheel excavator two-wheel bogie[J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(2): 473-485.
- [33] 刘长虹, 刘渭祈, 许承东. 挖掘机斗杆疲劳寿命可靠性预估[J]. 工程机械, 1995, 26(6): 19-21.
- LIU Chang-hong, LIU Wei-qi, XU Cheng-dong. Fatigue life reliability prediction of excavator bucket rod[J]. Construction Machinery and Equipment, 1995, 26(6): 19-21.
- [34] PARK S C. Design of excavator boom structure based on fatigue strength of weldment(II)[J]. Journal of Welding and Joining, 2011, 29(4): 61-66.
- [35] 苏琦. 液压挖掘机动臂强度分析与疲劳寿命预测[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- SU Qi. Strength analysis and fatigue life prediction of hydraulic excavator boom[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [36] 李泽军, 曹源文. 液压挖掘机斗杆疲劳寿命评估[J]. 机械工程师, 2013(5): 73-75.
- LI Ze-jun, CAO Yuan-wen. Fatigue life assessment for hydraulic excavator arm[J]. Mechanical Engineer, 2013(5): 73-75.

- [37] 李泽军. 液压挖掘机工作装置焊接疲劳寿命分析[D]. 重庆:重庆交通大学,2013.
LI Ze-jun. Welded fatigue life analysis of hydraulic excavator working device[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2013.
- [38] 童水光,王相兵,魏超,等. 液压挖掘机臂杆结构疲劳寿命预测方法研究[J]. 中国机械工程,2014,25(16):2167-2172.
TONG Shui-guang, WANG Xiang-bing, WEI Chao, et al. Research on fatigue life prediction method of for arm structure of hydraulic excavator[J]. China Mechanical Engineering,2014,25(16):2167-2172.
- [39] 谢玉婷,张华,鄢威,等. 液压挖掘机动臂的寿命分析预测[J]. 煤矿机械,2015,36(2):143-146.
XIE Yu-ting, ZHANG Hua, YAN Wei, et al. Life analysis and prediction of hydraulic excavator boom[J]. Coal Mine Machinery,2015,36(2):143-146.
- [40] 崔跃玉. 挖掘机动臂载荷谱试验研究及其疲劳寿命估算[D]. 西安:长安大学,2016.
CUI Yue-yu. The experiment research of loading spectrum of excavator boom and its fatigue life estimation[D]. Xi'an:Chang'an University,2016.
- [41] 朱建新,罗博艺,宋亚宫. 基于ANSYS的挖掘机动臂疲劳寿命仿真研究[J]. 计算机应用与软件,2017,34(2):112-117.
ZHU Jian-xin, LUO Bo-yi, SONG Ya-gong. Research of fatigue life simulation based on ANSYS for excavator boom[J]. Computer Applications and Software,2017,34(2):112-117.
- [42] YIN Y, GRONDIN G Y, OBAIA K H, et al. Fatigue life prediction of heavy mining equipment. Part 1: Fatigue load assessment and crack growth rate tests[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(11):1494-1505.
- [43] 曾宪任. 对DS60挖掘机工作装置开裂的研究[D]. 成都:西华大学,2010.
ZENG Xian-ren. The study to crack of the equipment of DS60 excavator[D]. Chengdu: Xihua University,2010.
- [44] 程珩,白瑞. 挖掘机工作装置疲劳寿命分析[J]. 振动测试与诊断,2011,31(4):512-516,538.
CHENG Hang, BAI Rui. Fatigue life prediction of the excavator working mechanism based on load history[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011,31(4):512-516,538.
- [45] 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 Jing-hua. Finite element analysis and welded fatigue life prediction of hydraulic excavator working device[D]. Qinhuangdao: Yanshan University,2015.
- [46] 张业祥. 反铲液压挖掘机工作装置疲劳寿命研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2016.
ZHANG Ye-xiang. Study on the fatigue life of working device of hydraulic excavator[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology,2016.
- [47] 盛亚君. 液压挖掘机工作装置在不同作业工况下的疲劳寿命研究[D]. 西安:长安大学,2017.
SHENG Ya-jun. Study on fatigue life of hydraulic excavator working device under different working conditions[D]. Xi'an: Chang'an University,2017.
- [48] 盛亚君,高阳. 挖掘机工作装置疲劳寿命的预测[J]. 山东交通学院学报,2020,28(2):77-84.
SHENG Ya-jun, GAO Yang. Prediction analysis of fatigue life of excavator working device[J]. Journal of Shandong Jiaotong University,2020,28(2):77-84.
- [49] 李申申. 大型液压挖掘机工作装置疲劳寿命研究[D]. 西安:长安大学,2017.
LI Shen-shen. Study on fatigue life of large hydraulic excavator working device of[D]. Xi'an: Chang'an University,2017.
- [50] 王宝刚. 挖掘机下车架疲劳试验加载谱研究与寿命预测[D]. 西安:长安大学,2018.
WANG Bao-gang. Research on loading spectrum for fatigue test and life prediction of excavator under-frame[D]. Xi'an: Chang'an University,2018.
- [51] LI Y, LU P M, WANG B H, et al. Failure analysis of bolts on fatigue test bench for excavator stick[J]. Engineering Failure Analysis,2020,118:104863.
- [52] WANG B H, LI K X, LU P M. Research on welding structure with transition changing faces at cylinder block on boom of medium excavator by means of hot spot stress approach[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention,2018,18(5):1127-1132.
- [53] 赵鹏华. 液压挖掘机铲斗疲劳寿命研究[D]. 西安:长安大学,2018.
ZHAO Peng-hua. Research on fatigue life of hydraulic excavator's bucket[D]. Xi'an: Chang'an University,2018.
- [54] 向清怡. 挖掘机工作装置关键部件载荷谱及疲劳试验研究[D]. 西安:长安大学,2018.
XIANG Qing-yi. Load spectrum and fatigue test studies of key components on excavator working device[D]. Xi'an: Chang'an University,2018.
- [55] ZHU Q Y, LU P M, XIANG Q Y. Fatigue life evaluation of web butt welding structure on boom of excavator by hot spot stress approach[J]. Engineering Failure Analysis,2020,113:104547.
- [56] 习艳会. 工程机械关键零部件疲劳寿命预测方法研究[D]. 西安:长安大学,2016.
XI Yan-hui. Research on fatigue life prediction meth-

- od of key components of construction machinery[D]. Xi'an:Chang'an University,2016.
- [57] 线 晨. 挖掘机转台寿命预测及软件开发[D]. 西安: 长安大学,2018.
XIAN Chen. Life prediction and software development of excavator turntable[D]. Xi'an:Chang'an University,2018.
- [58] T/CCMA 0074—2019, 挖掘机载荷谱试验方法[S].
T/CCMA 0074—2019, Test method of load spectrum for excavator[S].
- [59] T/CCMA 0073—2019, 挖掘机斗杆疲劳寿命试验方法[S].
T/CCMA 0073—2019, Test method of fatigue life for excavator bucket arm[S].
- [60] T/CCMA 0072—2019, 挖掘机动臂疲劳寿命试验方法[S].
T/CCMA 0072—2019, Test method of fatigue life for excavator boom[S].
- [61] ALTAMURA A, BERETTA S. Reliability assessment of hydraulic cylinders considering service loads and flaw distribution[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2012, 98:76-88.
- [62] DANICIC D, SEDMAK S, IGNJATOVIC D, et al. Bucket wheel excavator damage by fatigue fracture—Case study[J]. Procedia Materials Science, 2014, 3: 1723-1728.
- [63] 王西峰, 熊大田, 陈 京. 大型挖掘机的可靠性研究[J]. 中国机械工程, 1998, 9(2):14-17.
WANG Xi-feng, XIONG Da-tian, CHEN Jing. A study on the reliability of heavy excavator[J]. China Mechanical Engineering, 1998, 9(2):14-17.
- [64] 杜 林. 挖掘机动臂疲劳可靠性分析[J]. 机械, 2010, 37(5):25-27.
DU Lin. Fatigue reliability of the excavator's boom[J]. Machinery, 2010, 37(5):25-27.
- [65] 杨谋存, 章 玲, TAYLOR R A, 等. 基于 F2OMCDM 方法的在役挖掘机可靠性评价研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2014, 39(3):615-619.
YANG Mou-cun, ZHANG Ling, TAYLOR R A, et al. Reliability assessment on hydraulic excavator in service based on F2OMCDM method[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2014, 39(3):615-619.
- [66] 胡天松. 基于故障维修数据的大型矿用挖掘机可靠性评估与分配[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
HU Tian-song. Reliability evaluation and allocation of a large mining excavator based on failure and maintenance data[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [67] 邢举学. 液压挖掘机工作装置的疲劳可靠性研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
XING Ju-xue. Research on fatigue reliability of hydraulic excavator's manipulator[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [68] 杨 朕, 巩振深, 詹大桂, 等. 液压挖掘机可靠性分析研究[J]. 工程机械与维修, 2019(4):64-66.
YANG Zhen, GONG Zhen-shen, ZHAN Da-gui, et al. Reliability analysis of hydraulic excavator[J]. Construction Machinery & Maintenance, 2019(4):64-66.
- [69] 历 娜, 李志鹏, 王全永. 挖掘机工作装置铰链机构可靠性提升[J]. 建筑机械化, 2019, 40(5):64-66.
LI Na, LI Zhi-peng, WANG Quan-yong. Reliability improvement of excavator working device hinge mechanism[J]. Construction Mechanization, 2019, 40(5):64-66.
- [70] 侯文峰. 大型挖掘机回转平台可靠性提升研究[J]. 建筑机械化, 2020, 41(1):25-29.
HOU Wen-feng. Research on reliability improvement of large excavator rotary platform[J]. Construction Mechanization, 2020, 41(1):25-29.
- [71] 王军波, 宋荣昌, 董海平. 高价值弹药引信小子样可靠性试验与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
WANG Jun-bo, SONG Rong-chang, DONG Hai-ping. Small sample reliability test and evaluation for high-value ammunition fuze[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [72] 长安大学. 一种大型悬臂式承载结构的自平衡式抗疲劳试验台: 中国, CN107255599B[P]. 2019-09-20.
Chang'an University. Self-balanced anti-fatigue testing platform of large-size cantilever type bearing structure: China, CN107255599B[P]. 2019-09-20.
- [73] SHAO Y H, LU P M, WANG B H, et al. Fatigue reliability assessment of small sample excavator working devices based on bootstrap method[J]. Frattura Ed Integrità Strutturale, 2019, 13(48):757-767.
- [74] 邵雨虹, 吕彭民, 向清怡, 等. 基于 Bayes 方法的挖掘机动臂疲劳寿命可靠性评估[J]. 制造业自动化, 2018, 40(9):60-65.
SHAO Yu-hong, LU Peng-min, XIANG Qing-yi, et al. Reliability assessment of fatigue life of excavator arm based on Bayes method[J]. Manufacturing Automation, 2018, 40(9):60-65.