

文章编号:1671-251X(2017)10-0089-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017.10.018

在役液压支架部件剩余寿命估算

赵东波¹, 陆金桂¹, 姚灵灵², 王京涛¹

(1. 南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 东华大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘要:针对现有液压支架寿命估算方法很少考虑液压支架使用过程中技术性能不断下降而导致误差较大的问题,提出了在役液压支架部件剩余寿命估算方法。通过引入表面系数、结构尺寸系数和焊缝影响系数等来修正材料疲劳曲线,获得部件疲劳曲线;再根据累积损伤理论、剩余损伤容量和应力谱,利用部件的疲劳曲线进行寿命估算;采用多级模糊评定方法对在役液压支架顶梁进行状态评估,使用总体状态系数对寿命估算结果进行折合计算,获得在役液压支架部件的剩余寿命。试验结果表明,该方法的估算误差为3.52%,精度较高。

关键词:液压支架; 寿命估算; 剩余寿命; 疲劳曲线; 状态评估

中图分类号:TD355 文献标志码:A 网络出版时间:2017-09-27 15:05

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20170927.1505.018.html>

Residual life estimation of components of hydraulic support in service

ZHAO Dongbo¹, LU Jingui¹, YAO Lingling², WANG Jingtao¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China; 2. College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: In view of problem that existing hydraulic support life estimation method rarely consider continuous performance decline of hydraulic support in use process and leads to great error, a residual life estimation method of components of hydraulic support in service was proposed. Components S-N curve was obtained by correcting material S-N curve through introduction of surface coefficient, structural size coefficient and welding impact coefficient. Then the components S-N curve was used for life estimation according to cumulative damage theory, residual damage capacity and stress spectrum. Multi-level fuzzy evaluation method was used to evaluate the state of hydraulic support roof beam, and overall life coefficient was multiplied by the estimated life to get the residual life of the components of hydraulic support in service. The experimental results show that the estimation error of the proposed method is 3.52% and the precision is high.

Key words: hydraulic support; life estimation; residual life; S-N curve; state assessment

0 引言

液压支架部件寿命估算对保证液压支架在矿井下安全可靠地工作有重要的意义。近几年学者们研

究较多的寿命预估方法主要分为3类:基于力学的寿命预估方法^[1-3]、基于概率统计的寿命预估方法和基于信息技术的寿命预估方法。基于力学的寿命预估方法中最常用的是基于力学理论的寿命预估方

收稿日期:2017-04-20;修回日期:2017-08-10;责任编辑:胡娴。

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAF02B11)。

作者简介:赵东波(1986—),男,江苏淮安人,助理工程师,硕士,从事疲劳寿命与智能算法方面的研究工作,E-mail:zhaodongbo2853@163.com。

引用格式:赵东波,陆金桂,姚灵灵,等.在役液压支架部件剩余寿命估算[J].工矿自动化,2017,43(10):89-93.

ZHAO Dongbo, LU Jingui, YAO Lingling, et al. Residual life estimation of components of hydraulic support in service[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(10): 89-93.

法^[4-5]和基于有限元与累积损伤理论的寿命预估方法^[6-7],其中基于累积损伤理论的寿命预估方法提出较早且研究最为透彻,其累积损伤模型也较多^[8-11]。基于概率统计的寿命估算方法利用概率学、统计学的相关理论进行机械设备的寿命预估^[12]。基于信息技术的寿命预估方法主要利用专家系统、遗传算法、模糊理论、人工神经网络等进行机械设备的寿命预估^[13-15]。但现有的液压支架寿命估算方法很少考虑其在整个服役阶段损伤程度不同对循环应力加载的抵抗能力不同的情况,大多采用材料疲劳曲线(S-N曲线)代替部件S-N曲线进行疲劳寿命估算,误差很大。S-N曲线是表示一定循环特征下试件的疲劳强度与疲劳寿命之间关系的曲线,也称为应力-寿命曲线。本文提出一种在役液压支架部件剩余寿命估算方法,考虑了在役液压支架部件在使用过程中技术性能不断下降的情况,引入表面系数、结构尺寸系数和焊缝影响系数等来修正材料S-N曲线,获得部件S-N曲线,再利用部件的S-N曲线来进行寿命估算。

1 在役液压支架部件剩余寿命估算方法

在役液压支架部件剩余寿命估算步骤:①确定部件的总损伤容量。②计算部件的已用损伤量。③用总损伤容量减去已用损伤量,得到在役液压支架部件的剩余损伤容量。④根据液压支架所处的工作环境及要服役的矿井的载荷特点编制合理的应力谱。⑤以线性累积损伤理论为基础,对液压支架部件进行寿命估算。

总损伤容量的确定方法:液压支架部件从投入到报废所经历的损伤量的总和就是其总损伤容量。根据液压支架部件制造的技术水平,可确定液压支架部件的总损伤容量。如果部件整体状态良好,焊缝无缺陷,部件无变形,则认为其总损伤容量为1.1~1.3;如果部件有少量变形和缺陷,但仍然符合制造标准,则总损伤容量取0.9~1.0。

已用损伤量计算方法:损伤量即寿命被消耗的量。液压支架在服役过程中受到交变载荷的作用,导致寿命逐渐被消耗。根据线性累积损伤理论,每次应力作用下部件会产生一定量的损伤,如果部件在应力循环作用N次后发生断裂,那么每次产生的损伤量为总损伤容量的1/N。根据该理论,利用液压支架部件的S-N曲线和编制的应力谱可计算部件的已用损伤量。

在役液压支架部件寿命估算:根据累积损伤理论、剩余损伤容量和应力谱对在役液压支架的部件进行寿命估算,然后使用状态系数对寿命进行折合计算,最终获得在役液压支架部件的剩余寿命。

2 在役液压支架部件的S-N曲线

液压支架部件材料疲劳状态下的S-N曲线用非线性表达式可描述为

$$\lg N = A + B \lg(\sigma_{\max} - C) \quad (1)$$

式中:N为寿命;A,B,C为材料在一定应力集中系数和一定应力水平下的常数; $\sigma_{\max}$ 为部件危险部位疲劳强度。

标准试件(与部件材料相同)与在役液压支架部件的尺寸、表面粗糙度及所受载荷等不同,因此,不能直接使用液压支架部件材料的S-N曲线代替在役液压支架部件的S-N曲线,必须对其进行修正。液压支架部件疲劳强度的计算公式为

$$\sigma_b = \sigma_a \beta \epsilon H C_T C_L \quad (2)$$

式中: σ_b 为部件的疲劳强度; σ_a 为材料的疲劳强度,可通过S-N曲线得到; β 为表面系数; ϵ 为尺寸系数;H为焊接系数; C_T 为载荷停歇系数; C_L 为载荷类型系数。

3 实例分析

以某公司液压支架的主要承载部件——顶梁为例进行剩余寿命估算,检验在役液压支架部件剩余寿命估算方法的合理性与准确性。顶梁的主要材料为Q890。

3.1 在役液压支架顶梁S-N曲线计算

在役液压支架部件表面质量对疲劳强度的影响用表面系数 β 来表示, $\beta = \beta_1 \beta_2 \beta_3$,其中 β_1 为部件的表面粗糙度, β_2 为部件的表面组织结构系数, β_3 为部件的表面应力状态系数。顶梁的粗糙度是由液压支架的制造水平决定的,液压支架的筋板使用的是锻造的Q890材料,根据国产钢的实验数据可知 $\beta_1 = 0.85$ 。顶梁的表面处理方法是渗碳,所以 $\beta_2 = 1.1$ 。顶梁的表面采用喷丸强化,所以, $\beta_3 = 1.2$ 。综上, $\beta = 0.85 \times 1.1 \times 1.2 = 1.122$ 。

液压支架顶梁的破坏主要发生在筋板处,应计算筋板的尺寸系数。液压支架的筋板属于重型机械筋板,所以,使用合金钢的尺寸系数,取 $\epsilon = 0.85$ 。根据液压支架顶梁焊接的特点,取焊接系数 $H = 0.75$ 。液压支架在服役过程中会遇到移架或工人休

息的现象,这样液压支架部件所承受的载荷会出现停歇或者某部件处于固定的应力水平一段时间。研究表明,如果液压支架在没有腐蚀性液体或气体的环境下工作,那么液压支架部件的疲劳强度受载荷停歇的影响往往很小。因此,取载荷停歇系数 $C_T=1$ 。液压支架部件承受的外载荷主要包括拉压应力、弯曲应力和扭转应力。在没有试验数据为依据时,可以认为钢的载荷类型系数 $C_L=0.85$ 。

根据式(2)计算可得部件的总影响系数为0.608。材料 $S-N$ 曲线横坐标不变,纵坐标乘以影响系数,即可得到液压支架顶梁部件 $S-N$ 曲线。

3.2 在役液压支架顶梁状态评估

根据液压支架制造企业提供的液压支架实际服役和试验技术数据,液压支架单根立柱的额定工作压力为9 000 kN,最低工作高度为2.5 m,最高工作高度为4.5 m。在役液压支架的顶梁已用寿命为27 660次,检修2次,井下粉尘较少,无腐蚀性,水质一般。顶梁右内主筋靠近平衡耳处母材开裂,左右柱窝弯垫板与内主筋焊缝开裂,左右柱窝两侧与内外主筋焊缝开裂。顶梁前端变形量较大,与掩护梁铰接的平衡耳处存在挤压变形。

因为剩余寿命估算要考虑在役液压支架部件寿命的不断递减是非线性的,所以,需对顶梁进行状态评估。状态评估采用多级模糊评定方法。每个评价向量为5维,分别代表5个评级结果:好、较好、中、较差、差。评价向量数值由20名状态评估人员根据状态检测结果确定,每个数值代表评定此等级的评价人员占总评价人数的百分比。权重系数代表该评价项目的重要程度,使用层次分析法确定。

首先计算顶梁的状态系数和固有状态综合评价向量,然后进行总体状态评价。顶梁状态系数计算步骤:

(1) 变形情况,根据该顶梁的使用情况,腐蚀水平较轻,评价向量为

$$\mathbf{B}_{41} = (0.1 \quad 0.8 \quad 0.1 \quad 0 \quad 0) \tag{3}$$

(2) 焊缝开裂情况,根据对2项焊缝的检测,焊缝开裂情况较为严重,评价向量和权重系数分别为

$$\mathbf{B}_{42} = (0 \quad 0 \quad 0.1 \quad 0.9 \quad 0) \tag{4}$$

$$\mathbf{A}_{31} = (0.7 \quad 0.3) \tag{5}$$

损坏程度综合评价向量为

$$\mathbf{B}_{31} = (0.7 \quad 0.3) \begin{bmatrix} 0.1 & 0.8 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.9 & 0 \end{bmatrix} = (0.07 \quad 0.56 \quad 0.1 \quad 0.27 \quad 0) \tag{6}$$

(3) 顶梁的冲击载荷和平均载荷为中等水平,峰值载荷较大,平均载荷中等,应力条件综合评价向量为

$$\mathbf{B}_{32} = (0.5 \quad 0.4 \quad 0.1) \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.9 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.7 & 0.1 \\ 0 & 0.2 & 0.7 & 0.1 & 0 \end{bmatrix} = (0 \quad 0.02 \quad 0.6 \quad 0.34 \quad 0.04) \tag{7}$$

(4) 顶梁质量水平和使用操作水平较好,维护保养水平一般,则顶梁使用条件综合评价向量为

$$\mathbf{B}_{33} = (0.3 \quad 0.4 \quad 0.3) \times \begin{bmatrix} 0.1 & 0.9 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.8 & 0.1 \end{bmatrix} = (0.07 \quad 0.59 \quad 0.07 \quad 0.24 \quad 0.03) \tag{8}$$

通过对顶梁环境条件、应力条件和设备条件的综合评判,可以获得顶梁服役条件的评价向量:

$$\mathbf{B}_{25} = (0.2 \quad 0.6 \quad 0.2) \times \begin{bmatrix} 0.07 & 0.56 & 0.1 & 0.27 & 0 \\ 0 & 0.02 & 0.6 & 0.34 & 0.04 \\ 0.07 & 0.59 & 0.07 & 0.24 & 0.03 \end{bmatrix} = (0.028 \quad 0.242 \quad 0.394 \quad 0.306 \quad 0.03) \tag{9}$$

(5) 顶梁使用时间为设计寿命的60%,因此,评价为“中”,该顶梁使用时间的评价向量为

$$\mathbf{B}_{24} = (0 \quad 0.1 \quad 0.8 \quad 0.1 \quad 0) \tag{10}$$

(6) 顶梁的状态系数为

$$\mathbf{B}_{12} = (0.7 \quad 0.3) \times \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 0.8 & 0.1 & 0 \\ 0.028 & 0.242 & 0.394 & 0.306 & 0.03 \end{bmatrix} = (0.008 \quad 0.143 \quad 0.678 \quad 0.162 \quad 0.009) \tag{11}$$

顶梁的设计和制造水平良好,材质水平中等,可得顶梁固有状态的评价向量为

$$\mathbf{B}_{21} = (0.8 \quad 0.1 \quad 0.1 \quad 0 \quad 0) \tag{12}$$

$$\mathbf{B}_{22} = (0.1 \quad 0.8 \quad 0.1 \quad 0 \quad 0) \tag{13}$$

$$\mathbf{B}_{23} = (0.1 \quad 0.9 \quad 0 \quad 0 \quad 0) \tag{14}$$

顶梁固有状态综合评价向量为

$$\mathbf{B}_{11} = (0.3 \quad 0.3 \quad 0.4) \times \begin{bmatrix} 0.8 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.9 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (0.31 \quad 0.63 \quad 0.06 \quad 0 \quad 0) \tag{15}$$

顶梁总体状态评价向量为

$$B_0 = (0.5 \quad 0.5) \times \begin{bmatrix} 0.008 & 0.143 & 0.678 & 0.162 & 0.009 \\ 0.31 & 0.63 & 0.06 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (0.159 \quad 0.387 \quad 0.369 \quad 0.081 \quad 0.005) \quad (16)$$

如果将该顶梁的状态量化,即采用状态系数来表示,可将顶梁状态划分为5个离散值:1,0.8,0.6,0.4,0.2,根据加权平均法可求得该顶梁的总体状态系数:

$$V = \sum_{j=1}^n b_j v_j / \sum_{j=1}^n b_j = 0.7227 \quad (17)$$

式中: b_j 为层次状态评价系数; v_j 为各评价的权重系数。

分析状态评价的结果可知,该在役液压支架顶梁的总体状态为中等偏上水平。

3.3 在役液压支架顶梁寿命估算

在工程实际中可以通过贴应变片的方式来测量分析载荷。本文根据煤炭行业标准 MT312—2000,分别以9 000 kN的0.25,0.65,1.05倍对液压支架顶梁进行加载,根据加载后最大应力部位的数值来编制应力谱。对顶梁建立完全参数化模型,在有限元分析软件中对顶梁进行静应力加载分析。以寿命达到27 660次为服役的第1阶段,根据顶梁的S-N曲线和加载试验,利用损伤累积理论,借助有限元分析软件得到已用损伤量为0.62。根据顶梁的实际检测情况判定顶梁的总损伤容量为1.0,减去已用损伤量,可得顶梁的剩余损伤容量为0.38。

编制液压支架顶梁继续服役的应力谱,以危险应力的0.25,0.65,1.05倍为一个加载周期。根据部件S-N曲线计算每个应力峰值作用一次所消耗的损伤容量。用每个应力峰值所消耗的损伤容量分别乘以在该周期中出现的次数,然后相加,所得的和即为该加载周期消耗的损伤容量。以该应力谱对顶梁进行循环加载,得到每个加载周期消耗的损伤容量为 $0.26575285 \times 10^{-4}$ 。根据线性累积损伤理论,顶梁各应力水平下对应的寿命已经由部件S-N曲线给出。根据部件S-N曲线和继续服役期间的应力谱,当剩余损伤容量0.38消耗完时,总循环加载次数即剩余寿命为14 299次。由于支架顶梁在服役过程中已有部分损坏,服役后期同样大小应力峰值所实际消耗的损伤容量大于服役前期同等情况下所消耗的损伤容量,所以将理论计算的剩余寿命乘以顶梁的状态系数0.7227,得到顶梁的剩余寿命

为10 334次。

试验结果表明,该液压支架顶梁的实际剩余寿命为10 712次,与估算结果相比,误差为3.52%,可满足工程需要。

4 结语

根据累积损伤理论、剩余损伤容量和应力谱,使用液压支架部件的S-N曲线进行寿命估算,比直接使用液压支架部件材料的S-N曲线更加合理,提高了寿命估算的准确性。考虑到在役液压支架在服役的不同阶段损伤情况不同,采用多级模糊评定方法对在役液压支架顶梁进行状态评估,得到其总体状态系数。使用状态系数对估算结果进行折合计算,获得在役液压支架部件的剩余寿命。试验结果表明,提出的在役液压支架部件剩余寿命估算方法的估算误差为3.52%,精度较高。

参考文献(References):

- [1] 刘俭辉,王生楠,黄新春,等.基于损伤力学-临界面法预估多轴疲劳寿命[J].机械工程学报,2015,51(20):120-127.
LIU Jianhui, WANG Shengnan, HUANG Xinchun, et al. Multiaxial fatigue life prediction based on damage mechanics and critical plane method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(20): 120-127.
- [2] 凌骏,吴峰崎,周邵萍.基于有限元分析与有效应力强度因子幅的起重机寿命预估[J].华东理工大学学报(自然科学版),2015,41(3):424-428.
LING Jun, WU Fengqi, ZHOU Shaoping. Life prediction of crane based on finite element analysis and effective stress intensity factor range[J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 41(3): 424-428.
- [3] 白春玉,牟让科,马君峰,等.多轴应力响应下结构振动疲劳寿命预估的时域方法研究[J].机械科学与技术,2013,32(2):289-293.
BAI Chunyu, MU Rangke, MA Junfeng, et al. Time domain analysis for the estimation of structure vibration fatigue life under multiaxial stress responses[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(2): 289-293.
- [4] 龚宇,赵挺生,缪幸圆.液压支架双伸缩立柱力学及疲劳寿命计算[J].煤矿机械,2013,34(12):15-17.

GONG Yu, ZHAO Tingsheng, MIAO Xingyuan. Fatigue life analysis of double telescopic leg of hydraulic support[J]. Coal Mine Machinery, 2013, 34(12):15-17.

[5] 郑晓雯,张衡,刘金龙,等. 基于有限元法液压支架的疲劳寿命分析[J]. 矿山机械,2010,38(17):7-9.

ZHENG Xiaowen,ZHANG Heng,LIU Jinlong,et al. Fatigue life analysis of hydraulic support based on FEM[J]. Mining & Processing Equipment, 2010, 38 (17):7-9.

[6] 孙权,刘混举,李博. 浅埋深工作面液压支架疲劳寿命分析[J]. 机械工程与自动化,2015(5):131-132.

SUN Quan,LIU Hunju,LI Bo. Fatigue life analysis of hydraulic support in coal mining face with shallow mining depth [J]. Mechanical Engineering & Automation,2015(5):131-132.

[7] 徐坚,张勤. 液压支架横梁全寿命疲劳分析[J]. 郑州铁路职业技术学院学报,2013(3):5-6.

[8] 张小丽,陈雪峰,李兵,等. 机械重大装备寿命预测综述[J]. 机械工程学报,2011,47(11):100-116.

ZHANG Xiaoli, CHEN Xuefeng, LI Bing, et al. Review of life prediction for mechanical major equipments[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011,47(11):100-116.

[9] JIANG Y. A continuum mechanics approach for crack initiation and crack growth predictions [J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2006, 37(9):738-746.

[10] JIANG Y, DING F, FENG M. An approach for fatigue life prediction [J]. Journal of Engineering Materials and Technology,2007,129(2):182.

[11] QIU B X,GAO Z L,LU L J,et al. Two models for predicting fatigue crack growth [J]. Advanced Materials Research,2008,44-46:917-924.

[12] 刘婷,张铎,周源泉,等. 产品寿命预测[J]. 强度与环境,2007,34(4):58-64.

LIU Ting, ZHANG Duo, ZHOU Yuanquan, et al. Survey of product life prediction [J]. Structure & Environment Engineering,2007,34(4):58-64.

[13] 赖明荣. 基于状态检测的液压支架寿命预测方法研究 [D]. 太原:太原理工大学,2013.

[14] 张敏强. 焊接结构疲劳寿命评估问题的研究[D]. 大连:大连理工大学,2005.

[15] 王京涛,陆金桂,朱正权,等. 液压支架疲劳寿命近似估算[J]. 工矿自动化,2017,43(3):39-42.

WANG Jingtao, LU Jingui, ZHU Zhengquan, et al. Approximate estimation of fatigue life of hydraulic support[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(3):39-42.