

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2019041

基于损伤力学的 HL 级抽油杆疲劳分析研究

丁 雯¹, 彭振华¹, 张 园¹, 任向海¹, 张 辛², 吴 超²

(1. 中国石化西北油田分公司石油工程技术研究院, 新疆乌鲁木齐 830011; 2. 中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东青岛 266580)

摘 要: 抽油杆在使用过程中受到损伤会对其安全性能造成影响。为分析损伤对 HL 级抽油杆安全性能的影响程度, 根据损伤力学原理建立了抽油杆疲劳损伤演化模型, 采用有效应力法与 ANSYS 有限元软件, 对裂纹损伤、蚀坑损伤和偏磨损伤 3 种损伤形式下 HL 级抽油杆的剩余疲劳寿命进行了数值模拟。通过正交试验分析了 3 种损伤形式下深度、宽度、角度等影响因素对 HL 级抽油杆剩余疲劳寿命的影响, 并利用多元回归方法得到了疲劳寿命与影响因素的关系式。模拟结果表明, 3 种损伤形式下影响抽油杆疲劳寿命的因素, 按影响程度高低排列: 裂纹损伤, 依次为裂纹的位置、角度、深度和宽度; 蚀坑损伤, 依次为蚀坑的位置、深度和半径; 偏磨损伤, 依次为偏磨的位置、深度和长度。3 种损伤形式下 HL 级抽油杆疲劳寿命与影响因素回归关系式的调整决定系数分别为 82.0%、94.0% 和 90.9%。研究结果表明: 损伤位置对 HL 级抽油杆疲劳寿命的影响极其显著; 裂纹深度、角度, 蚀坑深度和半径及偏磨深度的影响显著; 裂纹宽度也有一定影响。3 种损伤形式下 HL 级抽油杆疲劳寿命与影响因素的回归关系式, 可为判断 HL 级抽油杆的剩余寿命提供依据。

关键词: 损伤力学; 抽油杆; 疲劳寿命; 数值模拟; 正交试验; 回归分析

中图分类号: TE933⁺.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2019)04-0047-07

Fatigue Analysis of HL Rod Based on Damage Mechanics

DING Wen¹, PENG Zhenhua¹, ZHANG Yuan¹, REN Xianghai¹, ZHANG Xin², WU Chao²

(1. Research Institute of Petroleum Engineering and Technology, Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang, 830011, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China)

Abstract: In order to analyze the influence of a damaged HL-class sucker rod on its safety performance during the process of use, the fatigue damage evolution model of the sucker rod was established according to the principle of damage mechanics combined with the effective stress method with ANSYS finite element software to conduct numerical simulations for the residual fatigue life of HL-class sucker rod under three kinds of damages, namely crack, corrosion pit and eccentric wear. The effects of three damage influencing factors (shape, size, position, etc.) on the residual fatigue life of HL-class sucker rods were analyzed by an orthogonal test, and the relationship between the fatigue life of HL-class sucker rod and the influencing factors was determined by multiple regression method under three kinds of damages. The simulation results showed that for crack damage, the impacts on fatigue life could be listed from top to bottom as the crack position, angle, depth and width. For corrosion pit damage, the impacts listed were the pit position, depth and radius; for the eccentric wear damage, the impacts were the eccentric wear position, depth and length. The adjust decision coefficient of the regression relationship between the fatigue life of HL-class sucker rod and the influencing factors under the three kinds of damages were calculated to be 82.0%, 94.0% and 90.9%, respectively. The research results indicated that the damage position had an extremely significant effect on the fatigue life of HL-class sucker rod. The depth and angle of crack, the depth and radius of the corrosion pit, and the eccentric depth had significant effects on the fatigue life, and the crack width exhibited a certain influence. The regression relationship between the fatigue life of HL-class sucker rod and the influencing factors under three kinds of damages could provide a basis for judging the residual life of HL-class sucker rod.

Key words: damage mechanics; sucker rod; fatigue life; numerical simulation; orthogonal test; regression analysis

HL 级抽油杆比 D 级抽油杆具有更高的承载能力, 适用于重载荷、超重载荷、无腐蚀或微腐蚀油井。随着抽油泵泵挂深度不断加深, HL 级抽油杆得到广泛应用, 为应对复杂的井下工况, 评估其在裂纹、蚀坑与偏磨等损伤形式下的安全性愈发重要^[1-3]。损伤力学是

收稿日期: 2018-08-10; 改回日期: 2019-02-19。

作者简介: 丁雯 (1985—), 女, 2008 年毕业于中国石油大学(华东)工业设计专业, 工程师, 主要从事人工举升采油技术方面的研究工作。E-mail: 534436180@qq.com。

基金项目: 国家科技重大专项“塔里木盆地碳酸盐岩油气田提高采收率关键技术示范工程”(编号: 2016ZX05053) 资助。

近30年发展起来的将固体物理力学、材料强度理论和连续介质力学统一起来的固体力学分支,与有限元软件结合在研究疲劳损伤中发挥了重要作用^[4-6]。林元华等人^[7]将损伤力学理论与有限元方法结合,建立了具有疲劳裂纹的抽油杆寿命计算模型。周瑞芬等人^[8-9]根据疲劳损伤耦合理论,采用“附加载荷-有限单元法”预估抽油杆使用寿命。丁新星^[10]采用损伤力学-有效应力法预估构件寿命。董赟等人^[11]提出了一种以循环次数划分步长的计算格式,利用该计算格式模拟计算了疲劳寿命和裂纹扩张路径。李大建和王军等人^[12-13]进行了HL级抽油杆疲劳试验,为分析HL级抽油杆的疲劳性能提供了试验数据。笔者基于损伤力学理论,在前人研究成果的基础上,建立了HL级抽油杆损伤演化模型,采用有效应力法,与ANSYS有限元软件相结合,通过数值模拟分析了不同损伤形式下HL级抽油杆寿命的影响因素。

1 HL级抽油杆疲劳损伤模拟

1.1 损伤演化模型

HL级抽油杆在工作过程中主要受交变拉压载荷的影响,因此笔者借助损伤力学耦合原理下单轴加载损伤演化方程^[8]与应力门槛值表达式^[9]建立了抽油杆的损伤演化模型:

$$\frac{dD}{dN} = \frac{c}{p+1} \frac{1}{(2E)^{p+1}} \frac{1}{(1-D)^{2p+2}} \left[(1-R)^{q(p+1)} \sigma_{\max}^{2p+2} - \sigma_{th0}^{2p+2} (1-D)^{(0.5+\beta)(2p+2)} \right] \quad (1)$$

式中: D 为损伤度; N 为循环次数; R 为应力比; $\sigma_{\max}$ 为材料受到最大载荷时对应的等效应力, MPa; σ_{th0} 为无损伤情况下的应力门槛值, MPa; E 为材料的弹性模量, MPa; β , c , p 和 q 为材料的损伤力学参数。

1.2 损伤等效应力与损伤有效应力

由于所建HL抽油杆模型的单元处于三维应力状态,需要将一维应力状态下推导的公式扩展到三维应力状态下, J. Lemaitre^[14]指出“采用损伤等效应力可以用与单向应力相同的方法计算三维应力状态下构件的损伤”,并根据热力学定律提出了损伤等效应力的三维应力模型:

$$\sigma_e = \bar{\sigma} \sqrt{\frac{2}{3} (1+\mu) + (1-2\mu) \left(\frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}} \right)^2} \quad (2)$$

式中: σ_e 为损伤等效应力, MPa; $\bar{\sigma}$ 为 von Mises 等效应力, MPa; σ_H 为静水压力, MPa; μ 为泊松比。

可根据单元的应力状态计算出单元的损伤等效应力。实际运算中,损伤会导致刚度降低,但损伤相对较小部位的应力升高。模型比较复杂时,如采用直接修改刚度矩阵的方法,计算量大且耗时长,因此根据损伤力学的应变等价原理^[10],采用损伤有效应力法。该方法只在开始时,计算一次构件应力场,每次循环读取的都是该次计算的单元应力状态,把得到的单元损伤等效应力按单元当前的累计损伤度修正为损伤有效应力,修正公式为:

$$\bar{\sigma}_e^* = \frac{\sigma_e}{1-D} \quad (3)$$

式中: $\bar{\sigma}_e^*$ 为损伤有效应力, MPa。

1.3 损伤参数的确定及试验验证

以长750.0 mm、直径19.0 mm、30CrMoA材料的无损HL级抽油杆试样为例,材料的弹性模量为 2.15×10^5 MPa,泊松比为0.3,密度为 7.8×10^3 kg/m³,利用最小二乘法拟合出疲劳特性参数 c , β , p 和 q 分别为 1.692×10^{-7} , 0.5, 0.507 1 和 0.193 2。利用ANSYS有限元软件建立模型,采用SOLID185单元自动划分网格(见图1,单位为mm),施加初始损伤后局部细化损伤处的网格,杆头(丝扣)所在一端固定,另一端施加500 MPa拉应力,采用生死单元模拟计算其疲劳寿命(假设某一单元含有微小初始损伤,初始损伤度 D_{0m} 为0.075)。

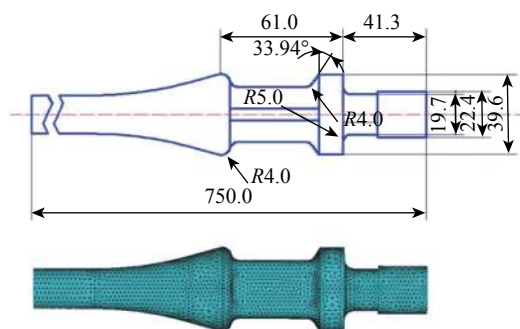


图1 模型及其网格划分

Fig. 1 Modeling and meshing

将模拟结果与试验结果进行对比,结果见表1。

从表1可以看出,模拟结果与试验结果的吻合度较好,相对误差基本在10%以内,说明可以用模拟方法模拟计算HL级抽油杆的疲劳寿命,分析HL级抽油杆疲劳寿命的影响因素。

表 1 模拟计算结果与试验结果对比
Table 1 Comparison of simulation results and test results

试样	试验寿命 $N_1/10^6$	计算萌生寿命 N_2	计算全寿命 N_3	误差, %
1	2.746			-8.3
2	2.836			-11.1
3	2.698	2 267 343	2 519 270	-6.6
4	2.758			-8.7

注: 误差计算公式为 $(N_3-N_1)/N_1$ 。

2 不同损伤形式下疲劳寿命的影响因素分析

为分析裂纹、蚀坑和偏磨 3 种损伤形式下 HL 级抽油杆疲劳寿命的影响因素, 对长 750.0 mm、直径 19.0 mm、30 CrMoA 材料的 HL 级抽油杆试件施加不同形状的初始损伤, 模拟计算其疲劳寿命。采用正交试验法设计模拟方案, 采用拟合法分析模拟结果。

2.1 模拟方案设计

由于正交试验法的优点是只需做少量试验就能找到可以全面反映最优组合的结果^[15-19], 因此, 根据 HL 级抽油杆损伤原因及损伤形状, 采用正交试验法设计影响因素水平。

在裂纹损伤条件下, 设计影响因素为裂纹的深度、宽度、角度(以垂直于轴线为 0°, 平行于轴线为 90°)和位置(距杆头的距离), 每个因素取 5 组水平, 各因素水平见表 2。

表 2 裂纹损伤正交试验因素与水平设计
Table 2 Orthogonal test factors and horizontal design under crack damage

水平	深度(X_1)/ mm	宽度(X_2)/ mm	角度(X_3)/ (°)	位置(X_4)/ mm
1	0.2	0.1	0	205
2	0.5	0.2	22.5	180
3	0.8	0.3	45.0	155
4	1.1	0.4	67.5	130
5	1.4	0.5	90.0	105

在蚀坑损伤条件下, 设计影响因素为蚀坑的深度、直径和位置, 每个因素取 5 组水平, 各因素水平见表 3。

表 3 蚀坑损伤正交试验因素与水平设计
Table 3 Orthogonal test factors and horizontal design under corrosion pit damage

水平	深度(X_1)/mm	半径(X_2)/mm	位置(X_3)/mm
1	1.4	2.6	125
2	1.7	3.0	145
3	2.0	3.4	165
4	2.3	3.8	185
5	2.6	4.2	205

在偏磨损伤条件下, 设计影响因素为偏磨的深度、长度和位置, 每个因素取 5 组水平, 各因素水平见表 4。

表 4 偏磨损伤正交试验因素与水平设计
Table 4 Orthogonal test factors and horizontal design under eccentric wear damage

水平	深度(X_1)/mm	半径(X_2)/mm	位置(X_3)/mm
1	3.5	18.0	125
2	3.8	22.0	145
3	4.1	26.0	165
4	4.4	30.0	185
5	4.7	34.0	205

2.2 模拟结果与分析

表 5—表 7 为不同损伤形式下正交试验设计及模拟结果。

计算不同损伤形式下各影响因素不同水平的疲劳寿命均值并绘制效用曲线, 结果见图 2—图 4。从图 2—图 4 可以看出, 无论何种损伤, 损伤发生位置都是影响疲劳寿命的最主要因素, 尤其是蚀坑损伤与偏磨损伤。对于裂纹损伤, 对疲劳寿命影响程度最高的是裂纹位置, 再依次为裂纹的角度、深度和宽度; 对于蚀坑损伤, 对疲劳寿命影响程度最高的是蚀坑位置, 再依次为蚀坑深度和半径; 对于偏磨损伤, 对疲劳寿命影响程度最高的是偏磨位置, 再依次为偏磨的深度和长度。

对表 5—表 7 中的数据进行方差分析, 结果见表 8。表 8 中的 α 为检验水平, α 越小显著性越高; F 为检验统计量, 为各因素离差平均平方与误差离差平均平方之比, 反映各因素对模拟结果影响程度的高低, 其临界值可通过查表得到。由表 8 可知, 3 种损伤的损伤位置对疲劳寿命的影响极其显著 ($\alpha=0.01$);

表5 裂纹损伤正交试验设计及试验结果

Table 5 Orthogonal test design and test results under crack damage

试验编号	X_1	X_2	X_3	X_4	疲劳寿命 L_1
1	0.2	0.1	0	205	994 892
2	0.2	0.2	22.5	180	1 102 051
3	0.2	0.3	45.0	155	1 317 174
4	0.2	0.4	67.5	130	2 500 000
5	0.2	0.5	90.0	105	2 500 000
6	0.5	0.1	22.5	155	1 010 830
7	0.5	0.2	45.0	130	2 500 000
8	0.5	0.3	67.5	105	2 500 000
9	0.5	0.4	90.0	205	989 846
10	0.5	0.5	0	180	431 339
11	0.8	0.1	45.0	105	2 500 000
12	0.8	0.2	67.5	205	628 589
13	0.8	0.3	90.0	180	1 700 021
14	0.8	0.4	0	155	531 815
15	0.8	0.5	22.5	130	874 619
16	1.1	0.1	67.5	180	369 078
17	1.1	0.2	90.0	155	1 692 268
18	1.1	0.3	0	130	1 067 690
19	1.1	0.4	22.5	105	2 500 000
20	1.1	0.5	45.0	205	158 617
21	1.4	0.1	90.0	130	2 500 000
22	1.4	0.2	0	105	1 285 243
23	1.4	0.3	22.5	205	66 213
24	1.4	0.4	45.0	180	130 036
25	1.4	0.5	67.5	155	431 063
极差	800 321	595 833	1 014 232	1 689 417	

裂纹的深度、角度, 蚀坑的深度和半径, 偏磨的深度对疲劳寿命的影响显著($\alpha=0.05$); 裂纹的宽度对疲劳寿命也有一定的影响($\alpha=0.10$)。

2.3 多元回归模型的建立

根据方差分析结果, 对裂纹、蚀坑和偏磨损伤

表6 蚀坑损伤正交试验设计及试验结果

Table 6 Orthogonal test design and test results under corrosion pit damage

试验编号	X_1	X_2	X_3	疲劳寿命 L_2
1	1.4	2.6	125	2 500 000
2	1.4	3.0	145	1 291 032
3	1.4	3.4	165	820 099
4	1.4	3.4	185	908 253
5	1.4	4.2	205	980 925
6	1.7	2.6	145	1 065 634
7	1.7	3.0	165	533 398
8	1.7	3.4	185	660 086
9	1.7	3.4	205	674 045
10	1.7	4.2	125	2 500 000
11	2.0	2.6	165	431 162
12	2.0	3.0	185	453 585
13	2.0	3.4	205	544 193
14	2.0	3.4	125	2 500 000
15	2.0	4.2	145	1 315 208
16	2.3	2.6	185	381 715
17	2.3	3.0	205	378 185
18	2.3	3.4	125	2 500 000
19	2.3	3.4	145	1 028 724
20	2.3	4.2	165	533 346
21	2.6	2.6	205	272 769
22	2.6	3.0	125	2 500 000
23	2.6	3.4	145	751 429
24	2.6	3.4	165	398 909
25	2.6	4.2	185	425 488
极差	430 342	220 737	1 956 617	

表7 偏磨损伤正交试验设计及试验结果

Table 7 Orthogonal test design and test results under eccentric wear damage

试验编号	X_1	X_2	X_3	疲劳寿命 L_3
1	3.5	18	125	2 500 000
2	3.5	22	145	805 186
3	3.5	26	165	423 364
4	3.5	30	185	419 706
5	3.5	34	205	520 804
6	3.8	18	145	700 960
7	3.8	22	165	296 416
8	3.8	26	185	339 017
9	3.8	30	205	387 780
10	3.8	34	125	2 500 000
11	4.1	18	165	208 970
12	4.1	22	185	246 554
13	4.1	26	205	281 643
14	4.1	30	125	2 500 000
15	4.1	34	145	754 748
16	4.4	18	185	175 036
17	4.4	22	205	203 339
18	4.4	26	125	2 500 000
19	4.4	30	145	619 838
20	4.4	34	165	130 559
21	4.7	18	205	1 047 777
22	4.7	22	125	2 500 000
23	4.7	26	145	463 436
24	4.7	30	165	208 597
25	4.7	34	185	221 550
极差	228 984	111 985	2 219 627	

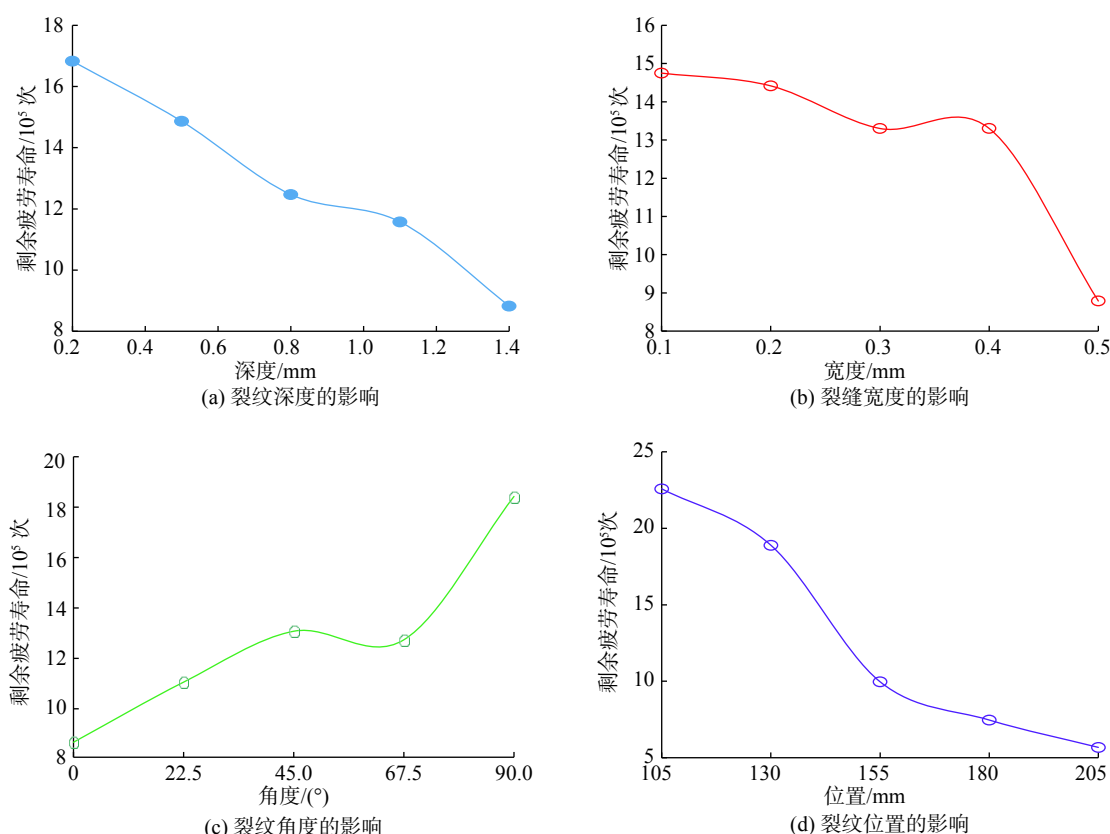


图 2 裂纹损伤形式下的效用曲线

Fig.2 Utility curve under crack damage

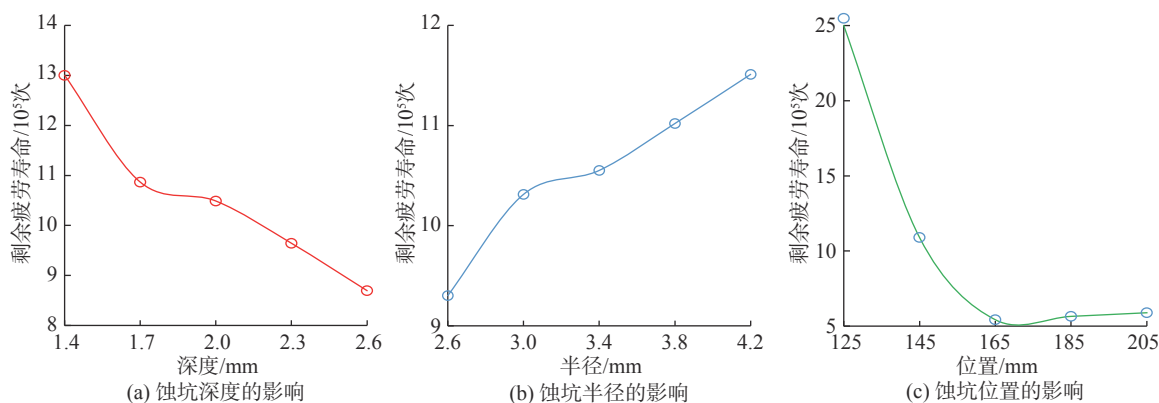


图 3 蚀坑损伤形式下的效用曲线

Fig.3 Utility curve under corrosion pit damage

中各损伤因素与疲劳寿命进行多元回归, 建立了 HL 级抽油杆各损伤因素与疲劳寿命之间的关系。

裂纹损伤中各因素与疲劳寿命之间的关系可表示为:

$$L_1 = 10\,958\,520 - 1\,946\,012X_1 + 5\,491\,248X_2 - 15\,246X_3 - 99\,564X_4 + 65\,638X_1^2 - 12\,759\,964X_2^2 + 71X_3^2 + 238X_4^2 - 359\,549X_1X_2 + 22\,719X_1X_3 + 1\,506X_1X_4 + 11\,998X_2X_4 \quad (4)$$

蚀坑损伤各因素与疲劳寿命之间的关系可表示为:

$$L_2 = 20\,817\,098 - 666\,892X_1 - 458\,864X_2 - 204\,621X_3 + 253\,711X_1^2 + 87\,601X_2^2 + 631X_3^2 + 189\,738X_1X_2 - 8\,086X_1X_3 - 2\,683X_2X_3 \quad (5)$$

偏磨损伤各因素与疲劳寿命之间的关系可表示为:

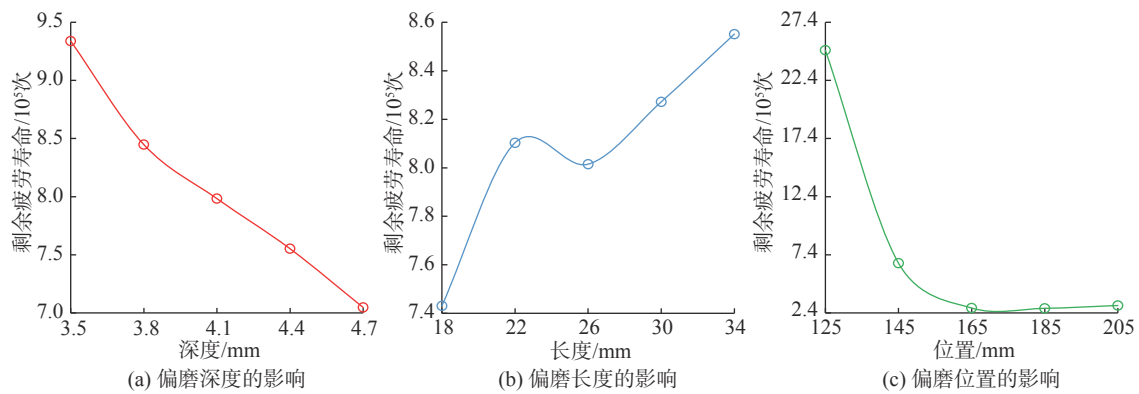


图4 偏磨损伤形式下的效用曲线

Fig.4 Utility curve under eccentric wear damage

表8 各损伤形式的正交试验方差分析结果

Table 8 Variance analysis results for each type of damage by orthogonal test

损伤类型	因素	自由度	<i>F</i>	<i>F</i> 临界值	α
裂纹	X_1	4	7.110	6.39	0.05
	X_2	4	4.309	4.11	0.10
	X_3	4	10.525	6.39	0.05
	X_4	4	41.283	16.00	0.01
蚀坑	X_1	4	19.168	16.00	0.01
	X_2	4	5.095	4.11	0.05
	X_3	4	522.640	16.00	0.01
偏磨	X_1	4	15.559	6.39	0.05
	X_2	4	3.468	4.11	0.10
	X_3	4	1 869.928	16.00	0.01

$$L_3 = 30\,555\,423 - 3\,088\,324 X_1 + 175\,555 X_2 - 294\,085 X_3 + 378\,423 X_1^2 + 6 X_2^2 + 743 X_3^2 - 42\,887 X_1 X_2 + 6\,244 X_1 X_3 \quad (6)$$

对式(4)一式(6)进行方差分析,结果见表9(表中 S 为平方和,其中: S_R 为回归平方和; S_E 为误差平方和; S_T 为总平方和, $S_T = S_R + S_E$)。

根据表9中的回归平方和、误差平方和以及总平方和数据,利用调整决定系数公式计算出3个回归关系式的调整决定系数分别为82.0%、94.0%和90.9%,说明3个回归关系式有意义。

调整决定系数的计算公式为:

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{S_E/(n-t)}{S_T/(n-1)} \quad (7)$$

式中: R_{adj} 为调整决定系数; n 为试验次数; $t=k+1$; k 为回归变量个数。

表9 各损伤多元回归模型的方差分析结果

Table 9 Variance analysis results for each incident of damage with multiple regression model

损伤类型	来源	自由度	<i>S</i>	<i>P</i>
裂纹	回归	12	1.688×10^{13}	0
	残差误差	12	1.667×10^{12}	
蚀坑	回归	9	1.443×10^{13}	0
	残差误差	15	5.146×10^{11}	
偏磨	回归	8	1.732×10^{13}	0
	残差误差	16	1.113×10^{12}	

3 结 论

1) 基于损伤力学建立了HL级抽油杆损伤演化模型,采用有效应力法和ANSYS有限元软件模拟计算了不同损伤形式(裂纹、蚀坑、偏磨等)下HL级抽油杆的疲劳寿命,模拟结果与试验结果相比,相对误差在10%以内,证明可以采用数值模拟方法分析损伤对HL级抽油杆疲劳寿命的影响。

2) 利用正交试验方法分析了各种损伤影响因素(形状、尺寸、位置等)对HL级抽油杆疲劳寿命的影响程度。各种损伤的损伤位置对疲劳寿命的影响极其显著;裂纹的深度、角度,蚀坑的深度和半径及偏磨的深度对疲劳寿命的影响显著;裂纹宽度对疲劳寿命也有一定的影响。

3) 建立了不同损伤形式下的多元回归模型,利用回归模型可定量描述各损伤因素与疲劳寿命之间的关系,为判断HL级抽油杆的安全性提供判断依据。

参 考 文 献

References

- [1] 王少力, 郑子元. 超高强度抽油杆在国内外的推广应用 [J]. 石油矿场机械, 2008, 37(4): 24–27.
WANG Shaoli, ZHENG Ziyuan. Domestic and foreign application of the super-strength sucker rod[J]. Oil Field Equipment, 2008, 37(4): 24–27.
- [2] 高鹏. H 级抽油杆柱力学特性及其设计方法研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2014.
GAO Peng. Research of grade H sucker rods string mechanical properties and its design method[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2014.
- [3] 徐嵩彦, 陈举涛, 袁良帅, 等. HL 级 35CrMoA 抽油杆杆体失效分析 [J]. 焊管, 2017, 40(6): 34–37.
XU Aiyan, CHEN Jutao, YUAN Liangshuai, et al. HL grade 35CrMoA sucker rod body failure analysis[J]. Welded Pipe and Tube, 2017, 40(6): 34–37.
- [4] 张行, 赵军. 金属构件应用疲劳损伤力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 1–9.
ZHANG Xing, ZHAO Jun. Applied fatigue damage mechanics of metallic structural members[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 1–9.
- [5] 唐雪松, 杨继运, 蒋持平, 等. 轴对称构件疲劳寿命预测的损伤力学—附加荷载—有限元法 [J]. 航空学报, 2002, 23(2): 97–101.
TANG Xuesong, YANG Jiyun, JIANG Chiping, et al. Damage mechanics-additional load-finite element method for fatigue life prediction of axisymmetrical structural members[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(2): 97–101.
- [6] 熊先仁. 损伤力学的最新发展 [J]. 江西电力职业技术学院学报, 2006, 19(1): 1–2.
XIONG Xianren. Recent progress of damage mechanics[J]. Journal of Jiangxi Vocational and Technical College of Electricity, 2006, 19(1): 1–2.
- [7] 林元华, 张德平, 骆发前, 等. 抽油杆疲劳寿命计算研究 [J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(6): 66–69.
LIN Yuanhua, ZHANG Deping, LUO Faqian, et al. Research on fatigue life calculation method of sucker rod[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(6): 66–69.
- [8] 周瑞芬. 抽油机井抽油杆失效问题的损伤力学研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.
ZHOU Ruifen. Study on damage mechanics of sucker rod failure of pumped well[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011.
- [9] 秦庆忠. 抽油杆成形及疲劳损伤仿真研究 [D]. 大庆: 大庆石油学院, 2010.
QIN Qingzhong. Simulation research on sucker-rod forming and fatigue damage[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2010.
- [10] 丁新星. 基于 ANSYS 的损伤力学—有效应力法预估构件寿命 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.
DING Xinxing. The actual stress method based on damage mechanics to predict life on ANSYS platform[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011.
- [11] 董赞, 蔡敢为, 郑战光, 等. 基于损伤力学的疲劳寿命和裂纹扩展的数值分析 [J]. 中国机械工程, 2010, 21(20): 2412–2415.
DONG Yun, CAI Ganwei, ZHENG Zhanguang, et al. Numerical analyses of fatigue life and crack growth based on damage mechanics[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(20): 2412–2415.
- [12] 李大连, 陆梅, 郭靖, 等. H 级抽油杆疲劳性能试验分析 [J]. 石油矿场机械, 2015, 44(12): 42–44, 73.
LI Dajian, LU Mei, GUO Jing, et al. Fatigue test analysis of H sucker rod[J]. Oil Field Equipment, 2015, 44(12): 42–44, 73.
- [13] 王军, 史交齐, 姬丙寅. HL 级抽油杆性能对比研究 [J]. 石油工业技术监督, 2017, 33(5): 31–33.
WANG Jun, SHI Jiaoqi, JI Bingyin. Comparative study on performance of HL-class sucker rod[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2017, 33(5): 31–33.
- [14] LEMAITRE J. A course on damage mechanics[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1996.
- [15] 王玄静. 正交试验设计的应用及分析 [J]. 兰州文理学院学报(自然科学版), 2016, 30(1): 17–22.
WANG Xuanjing. Application and analysis of orthogonal experimental design[J]. Journal of Lanzhou University of Arts and Science (Natural Sciences Edition), 2016, 30(1): 17–22.
- [16] 马喜平, 侯代勇, 代磊阳, 等. 共聚物钻井液降滤失剂的合成与性能评价 [J]. 钻井液与完井液, 2015, 32(2): 39–42.
MA Xiping, HOU Daiyong, DAI Leiyang, et al. Synthesis and evaluation of copolymer filter loss reducer[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2015, 32(2): 39–42.
- [17] 余东合, 于柏慧, 车航, 等. 乌里雅斯太油田太 27 断块整体压裂数值模拟 [J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(1): 77–82.
YU Donghe, YU Baihui, CHE Hang, et al. Numerical simulation on overall fracturing of fault block Tai 27 in Wuliyasitai Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(1): 77–82.
- [18] 胡琴, 李志强, 任航. 模糊正交法在弧形盘式齿破岩性能评价中的应用 [J]. 断块油气田, 2019, 26(3): 389–393.
HU Qin, LI Zhiqiang, REN Hang. Application of fuzzy orthogonalization to rock-breaking performance of arc disc teeth[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2019, 26(3): 389–393.
- [19] 史树有, 杨胜来, 张宏丹. 施工因素对微生物驱油效果影响的物理模拟研究 [J]. 石油钻探技术, 2013, 41(1): 93–97.
SHI Shuyou, YANG Shenglai, ZHANG Hongdan. Physical simulation study on effect of operation factors on MEOR[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(1): 93–97.

[编辑 刘文臣]