抽油杆疲劳性能实验分析

梁毅[1,2]，赵春[1,2]，樊松[1,2]，雷宇[1,2]，石海霞[1,2]

（1. 中国石油长庆油田分公司，西安 710018；2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室，西安 710018）

摘要：目的 有效地预防和减少因抽油杆断裂导致的油井修井作业，进一步降低油田开发成本。**方法** 采用岛津电液伺服疲劳试验机，对 D 级和 H 级抽油杆进行材质成分分析，测试力学性能、空气和腐蚀介质下疲劳强度、拉压载荷对疲劳性能的影响，并进行对比分析。**结果** H 级抽油杆的力学性能优于 D 级抽油杆。随着含水量的增加，两种抽油杆的抗疲劳性能均降低，在空气中，H 级抽油杆的疲劳性能均优于 D 级抽油杆。在腐蚀环境中，D 级抽油杆的疲劳性能优于 H 级抽油杆，并且两种抽油杆所受拉压载荷对疲劳均有一定影响。**结论** 含水是影响抽油杆腐蚀疲劳性能的关键因素，H 级抽油杆应在低含水区块应用，D 级抽油杆在中高含水区块应用。抽油杆中和点以下产生的附加拉应力是导致抽油杆偏磨的直接原因，在中和点以下应优化扶正防磨设计。在中高含水区块，应加大对服役年限较长抽油杆的更换力度，以减少和预防抽油杆断裂事故的发生。

关键词：抽油杆；力学性能；腐蚀介质；疲劳强度；拉压载荷

DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2019.07.009

中图分类号：000 **文献标识码：**A

文章编号：1672-9242(2019)07-0039-04

Experimental Analysis of Sucker Rod′s Fatigue Performance

LIANG Yi[1,2], *ZHAO Chun*[1,2], *FAN Song*[1,2], *LEI Yu*[1,2], *SHI Hai-xia*[1,2]

(1. Changqing Oilfield Company of CNPC, Xi′an 710018, China; 2. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi´an 710018, China)

ABSTRACT: Objective To effectively prevent and reduce the workover of oil wells caused by sucker rod breakage, and further reduce the cost of oil field development. **Methods** In this paper, Shimadzu electro-hydraulic servo fatigue testing machine was used to analyze the material composition of sucker rods of classes D and H, and the mechanical properties, fatigue strength under air and corrosive media, and the effect of tensile and compressive loads on fatigue performance were tested for comparison and analysis. **Results** The mechanical performance of Class H rods was better than that of Class D rods. The fatigue resistance of both rods decreased with the increase of water content. In the air, the fatigue performance of Class H rods was Superior to that of Class H sucker rods; in the corrosive environment, Class D sucker rods had better fatigue performance than Class H rods. The tension and compression load of both sucker rods had certain influences on fatigue. **Conclusion** Water content is a key factor that influences the corrosion fatigue performance of sucker rods. Class H sucker rods should be applied in low-water-bearing blocks. Class D sucker rods should be used in mid-high water-cut blocks. The additional pulling stress produced below the neutral point of sucker rods is a direct cause of eccentric wear of sucker rods. The design of righting and anti-wear should be optimized below the neutral point; in mid-high water cut areas, the replacement of sucker rods with longer service life should be

收稿日期：2019-02-05；**修订日期：**2019-03-05

基金项目：中国石油天然气股份有限公司重大科技项目（1602-1-2）

作者简介：梁毅（1982—），男，硕士，工程师，获学位，主要研究方向为有杆泵采油优化技术。

used to reduce and prevent fracture of sucker rods.

KEY WORDS: sucker rod; mechanical property; corrosion medium; fatigue strength; tensile load

抽油机有杆泵采油占人工举升 80%以上，抽油杆在其中起着至关重要的作用。D 级和 H 级抽油杆是油田最常用的两种抽油杆，通过现场应用分析，因抽油杆断裂造成油井修井的比例达 35%，直接增加了油井生产运行成本。由此可见，确保抽油杆的正常工作具有重大的经济效益。

美国古德曼（Goodman）用实验的方式得到了抽油杆使用寿命可达 1000 万次而不至于发生断裂的结论[10]。国内路永明、林元华等[19]提出了预测抽油杆疲劳寿命的 Paris 模型和 Forman 模型。骆竞晞等人[24]运用 Paris 模型分析了当抽油杆存在可扩展裂纹时的剩余寿命。胡雨人等人[25]提出通过实测抽油杆材料的力学性能去推测疲劳特性的方法。以上研究方法均未充分考虑油井生产过程中抽油杆所受的井液腐蚀、拉压载荷等实际工作环境。因此，文中模拟抽油杆实际工作环境条件下（载荷条件和腐蚀介质），对 D 级和 H 级抽油杆进行材质成分分析、静强度测试、空气介质和腐蚀介质下的疲劳强度测试等实验分析工作，对两种抽油杆的疲劳性能作出评价，为抽油杆的选择提供指导。

1 室内实验

实验选用 D 级和 H 级抽油杆柱，采用岛津电液伺服疲劳试验机，严格按照 GB 6397—86《金属拉伸试验试样》执行，开展抽油杆拉伸性能和腐蚀疲劳性能测试。

1.1 拉伸性能测试

为了能更好地进行各项相关的疲劳试验，首先应该清楚抽油杆的基本力学性能指标。通过对试样进行大气中的静拉伸试验，从而计算出材料的基本力学性能指标。两种抽油杆化学成分见表 1。

表 1 D 级和 H 级抽油杆柱的化学成分 %

元素		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
质量分数	D 级	0.252	0.290	0.952	0.012	0.006	0.929	0.015
	H 级	0.344	0.267	0.468	0.015	0.008	0.847	0.171
元素		Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V
质量分数	D 级	0.005	0.042	0.010	0.013	0.003	0.002	0.062
	H 级	0.032	0.005	0.011	0.122	0.002	0.001	0.006

在大气室温下进行静拉伸试验，为计算各种力学性能指标，引用式（1）—（3）。经计算后，D 级和 H 级抽油杆柱的力学性能指标见表 2。

应力计算公式： $\sigma = P / \mathrm{A}_0$ (1)

伸长率计算公式： $\delta = \dfrac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$ (2)

断面收缩率计算公式： $\psi = \dfrac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$ (3)

式中：P 为试验机所施加的载荷值；A_0 为试样原始截面积；A_1 为试样断裂处截面积；L_1 为试样断裂后标距；L_0 为试样原始标距。

表 2 材料力学性能指标

钢级	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	断面收缩率 ψ/%
H	1064.07	1036.05	20.31	73.32
D	949.89	907.88	18.72	68.74

1.2 腐蚀疲劳性能测试

在油井实际生产条件下，抽油杆断裂与井筒腐蚀状况有直接的关系。因此，通过疲劳试验测得抽油杆型号在各种腐蚀介质中的疲劳性能指标，进行对比分析，以便为工况选材提供必要的依据。

取频率 f=10 Hz、应力比 R=0.1 的正弦波形，在室温下进行腐蚀疲劳试验。试验的起始载荷应力一般取值：$\sigma_{max} \approx 0.9\sigma_b$，设循环应力幅值为 σ_a。

$$R = \sigma_{max} / \sigma_{min} \quad (4)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (5)$$

由式（4）、（5）联立求解，可求得最小应力 σ_{min} 及应力幅值 σ_a，于是求得平均应力 σ_m：

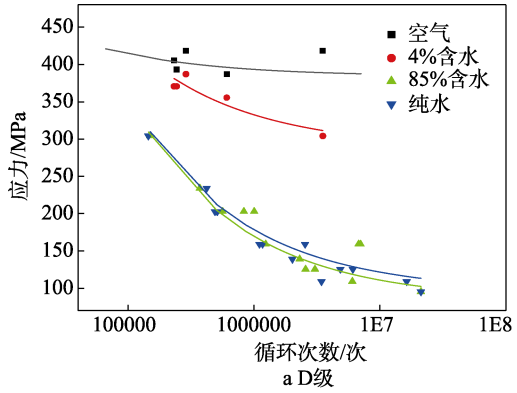
$$\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min}) / 2 \quad (6)$$

根据以上计算得出的 σ_m、σ_a 及相关试验参数进行疲劳试验。

1.2.1 抽油杆在不同介质中疲劳性能

分别考虑井液介质含水率为 100%、85%、4%和空气的情况下，开展 D 级和 H 级的疲劳性能实验。从图 1 可以看出，D 级和 H 级抽油杆在原油中的抗疲劳性能随油水混合介质中含水率的增加而急剧下降，H 级抽油杆降低的幅度更大一些，说明含水率是影响疲劳性能的最主要参数。含水 100%对抽油杆材料的腐蚀性最大，因为产出液由油包水型变为水包油型，管杆表面由油润湿变为水润湿，失去了原油的保护作用，加快了管杆之间腐蚀的速度。含水率低时，管杆摩擦面处于良好的油润滑状态，动摩擦因数较小，磨损较轻；当含水率高时，管杆摩擦处于水润滑状态，动摩擦因数大大增加，加快了管杆磨损。

由图 2 可以看出，在空气中，H 级杆的抗疲劳性能高于 D 级抽油杆。当含水率上升时，H 级杆的抗疲劳性能显著低于 D 级抽油杆。



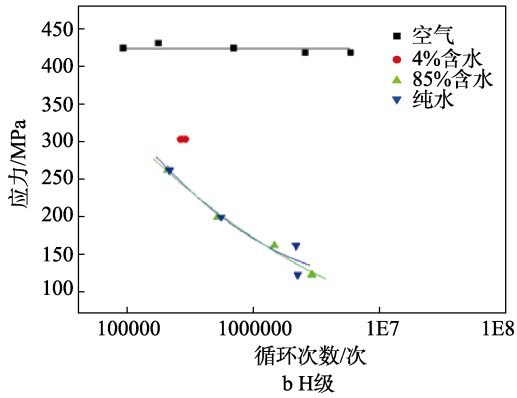
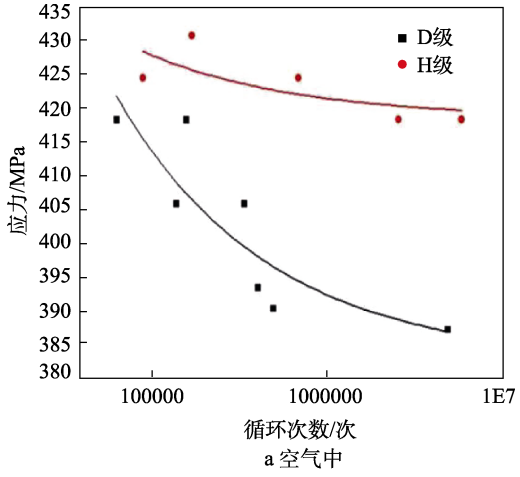


图 1　抽油杆在不同介质中疲劳寿命曲线



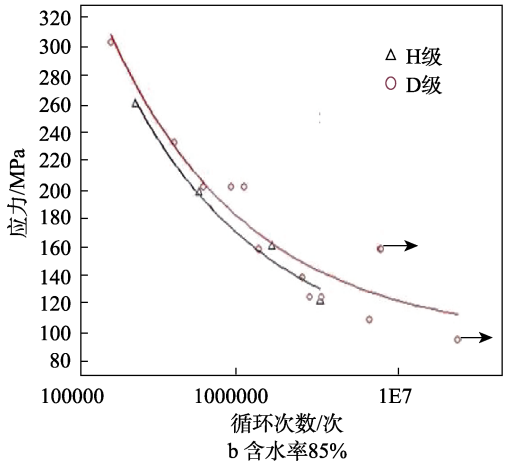
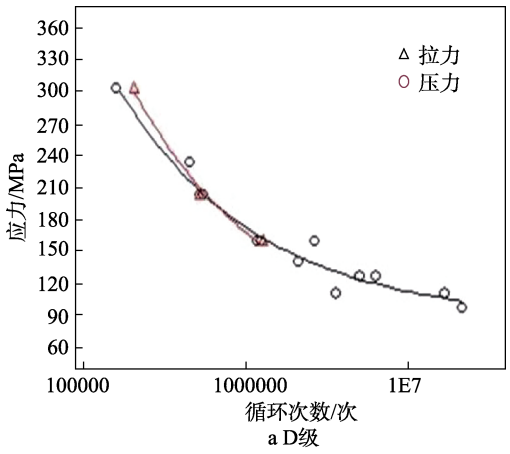


图 2　抽油杆在空气中和井液介质含水率 85%下的疲劳寿命曲线

1.2.2　拉压载荷对抽油杆腐蚀疲劳性能的影响

抽油杆在使用过程中，既受到拉应力作用，同时在中和点以下还受到压应力作用。为了弄清楚压载荷对抽油杆柱腐蚀疲劳性能的影响及影响程度，测试拉压载荷对抽油杆腐蚀疲劳性能的影响，如图 3 所示。可以看出，拉压载荷对两种抽油杆都有一定影响。D 级抽油杆在应力幅小于 190 MPa 时，压应力的疲劳寿命略低于拉应力作用下的寿命；H 级抽油杆两条曲线在应力幅小于 177 MPa 时，压应力的疲劳寿命略低于拉应力作用下的寿命。分析得出，应力幅为某一值时，该点的拉、压载荷相等，即该点处为抽油杆中和点，受力为 0。当应力幅小于该点值时，即中和点以下的螺旋弯曲所产生的附加拉应力会使抽油杆加速偏磨，致使抽油杆断裂。



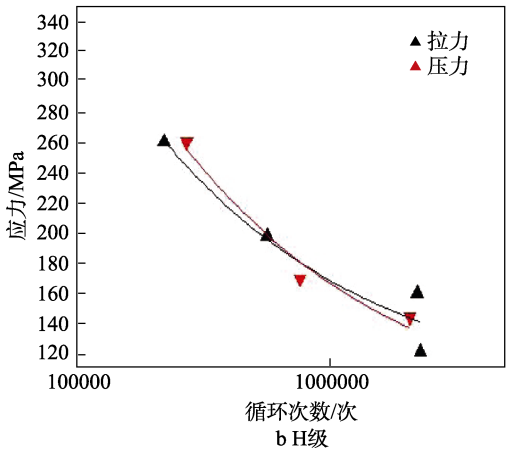


图 3　抽油杆在纯水下的拉压载荷疲劳寿命曲线

2　腐蚀疲劳性能差异的原因分析

通过以上实验分析和理论计算，可以得出 H 级抽油杆在空气中的抗疲劳性能明显优于 D 级抽油杆，主要原因为：

1）从材料成分来看，H 级抽油杆中碳的质量分数为 0.344%，而 D 级抽油杆为 0.252%。含碳量高的材料，抗拉强度高，因此空气中 HL 级抽油杆性能优

于 D 级。

2）从材料硬度分析，H 级抽油杆的洛氏硬度和显微硬度均低于 D 级抽油杆，因此 D 级抽油杆比 H 级致脆。在空气中作疲劳试验，H 级抽油杆的寿命明显高于 D 级抽油杆。

3）从静拉伸试验中也可以证明，H 级抽油杆的抗拉强度高于 D 级，并且屈服强度高于 D 级，所以 H 级抽油杆在空气中的抗疲劳性能优于 D 级。

通过以上实验分析，可以得出在原油、油水混合介质和纯净水的腐蚀环境下，H 级抽油杆的抗腐蚀性能低于 D 级。随着油中含水量的增加，两种型号抽油杆的抗疲劳性能趋于一致。在较高应力区，H 级抽油杆的抗腐蚀疲劳性能略低于 D 级抽油杆，主要是抽油杆中合金元素的影响。

由表 1 和表 2 可以看出，D 级抽油杆材料中 Si、Cr 合金元素含量均高于 H 级抽油杆。Si 元素含量高的钢在氧化气氛中加热时，表面将形成一层 SiO_2 薄膜，从而提高钢在高温时的抗氧化性和耐氧化性介质腐蚀的作用。Cr 元素使钢具有良好的抗腐蚀性和抗氧化性，因此 D 级抽油杆的抗腐蚀性能高于 H 级。

3 结论

1）H 级抽油杆的抗拉强度、屈服强度等基本力学性能指标及空气中的疲劳寿命均优于 D 级抽油杆。

2）含水率是影响抽油杆腐蚀疲劳性能的关键因素。随着含水的增加，抽油杆疲劳寿命降低，并且 H 级抽油杆降低的幅度更大。当含水率较低时，含水率稍微有所增加，寿命大幅度降低；当含水较高时，寿命降低幅度不大。因此，H 级抽油杆应在低含水区块应用，D 级抽油杆在中高含水区块应用。

3）抽油杆压应力引起的中和点以下的螺旋弯曲所产生的附加拉应力，是导致抽油杆偏磨的直接原因，因此在中和点以下应优化扶正防磨设计，延缓抽油杆断裂。

4）在中高含水区块，应加大对服役年限较长的抽油杆更换力度，以减少和预防抽油杆断裂事故的发生。

参考文献：

[1] 黄伟, 韩二涛, 张岩. 超高强度抽油杆许用应力的计算[J]. 西安石油大学学报, 2015, 30(4).

[2] 张岩. 一种超高强度抽油杆强度校核方法技术研究[J]. 化工管理, 2014, 21(7): 119-120.

[3] 张岩, 韩二涛, 常崇武, 王新宇. 一种“奥金格”许用应力计算方法技术研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2014, 23(12): 58-59.

[4] 王成文. 抽油杆疲劳可靠性分析[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.

[5] 郝丽丽. 抽油杆失效分析及剩余寿命的研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2008.

[6] 张连山. 国外新结构和高强度抽油杆的技术发展[J]. 国外石油机械, 1998, 6(3): 24-29.

[7] 文志雄, 易晓蓉. SY/T 6272—1997《超高强度抽油杆》标准验证研究[J]. 石油机械, 2005, 33(6): 5-7.

[8] 陈国明, 东升方, 方华灿. 超高强度抽油杆的可靠性增长试验[J]. 石油大学(自然科版), 1993, 17(3): 58-64.

[9] GB/T 228—2002, 中华人民共和国国家标准-金属材料室温拉伸试验方法[S].

[10] 刘茂. 确定抽油杆许用应力的古德曼应力图法剖析[J]. 石油矿场机械, 1986, 15(2): 7-9.

[11] 吕瑞典, 许明. 修正的古德曼应力图及许用安全系数[J]. 石油学报, 2001, 22(6): 86-90.

[12] SY/T 6272—1997, 中华人民共和国石油天然气行业标准-超高强度抽油杆[S].

[13] 高建明, 程晓敏, 余新泉, 等. 材料力学性能[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2003.

[14] 黄东升, 赵学胜, 宋孟裕. 超高强度抽油杆的疲劳筛选试验[J]. 石油机械, 1993, 21(10): 22-27.

[15] 李其. 抽油杆表面裂纹及剩余寿命的可靠性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.

[16] 王国丽, 魏嘉荃, 钟伯明, 等. 抽油杆材料疲劳裂纹扩展规律的概率研究[J]. 大庆石油学院学报, 1993, 17(1): 78-82.

[17] 李晓秋. 抽油杆可靠性及其剩余寿命研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2007.

[18] 姚红星, 柳春图. 抽油杆裂纹扩展的实验研究和剩余疲劳寿命的预测[J]. 机械强度, 2007, 29(5): 865-869.

[19] 胡雨人. 抽油杆疲劳断裂研究—寿命预估[J]. 石油学报, 1989, 10(1): 122-130

[20] 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.

[21] 李其, 魏嘉荃, 钟伯明, 等. 抽油杆剩余寿命的研究[J]. 大庆石油学院学报, 1994, 18(4): 53-56.

[22] 孟宪红, 苏芳. 抽油杆剩余寿命与初始表面裂纹形状关系研究[J]. 石油矿场机械, 2007, 36(10): 8-10.

[23] 张红. 抽油机井检泵周期与杆柱寿命的可靠性预测方法[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.

[24] 张琪. 采油工程原理与设计[M]. 东营: 中国石油大学(华东)出版社, 2000: 143-146.

[25] 李年. D 级抽油杆表面允许裂纹深度的估算[J]. 石油机械, 1995, 23(11): 25-28.

[26] 胡雨人. 随机疲劳的寿命预估初探[J]. 航空学报, 1988, 9(s1): 32-35.