Journal of Mechanical Strength 机械强度 2007,29(5):865～869

●研究简报●

抽油杆裂纹扩展的实验研究和剩余疲劳寿命的预测*

EXPERIMENT STUDY OF A CRACK GROWTH AND PREDICTION OF RESIDUAL LIFE FOR THE SUCKER ROD

姚红星** 柳春图

(中国科学院 力学研究所,北京 100080)

YAO HongXing LIU ChunTu

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing* 100080, *China*)

摘要 应用超声波探测抽油杆疲劳裂纹扩展时的深度 a,通过室内实验找出D级抽油杆裂纹深度 a 和裂纹宽度 c 之间的比趋向于0.78,简化后可直接研究超声波信号 V 和裂纹深度 a 之间的关系,从而用 $V-a$ 关系估算有疲劳裂纹D级抽油杆的剩余寿命,避免杆断带来的经济损失。

关键词 超声波探测仪 裂纹扩展 剩余寿命 抽油杆

中图分类号 TE933.2 TG115.285 TH114

Abstract The supersonic inspector is used to measure crack depth of sucker rod during fatigue crack growth. The experimental results show that ratio a/c (a ——depth of crack and c ——width of crack) is approximative 0.78. Then the $V-a$ (V ——signal of supersonic) relation can used to calculate residual life of the sucker rod. The variance regularity of leading edge of crack growth is studied from endurance test of sucker rods. The relationship between depth and area of crack is obtained. Then, the formula calculating residual life of sucker rod from crack area is given. The Paris formula is used to establish the relation of ultrasonic inspection and crack depth, and the relation of crack detection signal and crack growth. The predicted results by proposed method of residual life using simulated test are agreed well with the predicted those by the theory.

Key words Supersonic inspector; Crack growth; Residual life; Sucker rod

Corresponding author: *YAO HongXing*, *E-mail*: *cy2_yaohx@petrochina.com.cn*, *Tel*: +86-317-2561582

Manuscript received 20060601, in revised form 20060808.

1 引言

当前,世界各国陆上石油生产均以机械采油为主,我国共有各类抽油机井约6万多口,连接抽油机和抽油泵的杆件是抽油杆,全国年消耗量在2千万米以上。抽油杆承受交变载荷,其疲劳断裂是造成油井事故的重要原因之一。华北油田每年有近3百口井因抽油杆断裂而造成停产修井,经济损失达2千多万元,因此正确判断抽油杆的使用寿命,预防抽油杆的井下断裂有十分重要的经济和社会意义。文献[1～5]对抽油杆的疲劳断裂作了一些研究。李国义等[5]用人工模拟的不规则初始裂纹,从实验和理论两方面对抽油杆螺纹段的裂纹形貌进行了研究,结果表明无论如何初始化裂纹形状,在裂纹扩展过程中裂纹前缘立即椭圆化,其形状是等离心率的同心椭圆,并且无论初始情况如何,随着相对裂纹深度 a/R 的增加,椭圆两个轴长之比趋近于0.8,因而建议人工模拟裂纹可以直接制作为椭圆形状,而无需考虑不同的形状比。

本文介绍使用疲劳裂纹超声波检测实验装置所得到的研究结果,该实验装置由华北油田和中国科学院力学研究所合作研制。超声波探测主要是通过测量信号的幅度和发射器的位置来确定缺陷的大小和方位,它对于平面状态缺陷如裂纹具有很好的探测效果,与涡流法和漏磁法相比,超声波探伤方法具有指向性好、灵敏度高、性能稳定和不受电磁干扰的特点,探测抽油杆裂纹精度可以达到0.3 mm。

根据实测结果,以传统的Paris公式[6]为基础,通过对抽油杆疲劳裂纹扩展规律的研究,将超声波无损检测手段应用于裂纹扩展实验,建立超声波无损检测信号与裂纹深度的关系,最终实现工程上判定裂纹尺寸与预报抽油杆疲劳寿命的目的。

2 研究的理论基础

2.1 抽油杆疲劳裂纹扩展规律

* 20060601收到初稿,20060808收到修改稿。

** 姚红星,男,1968年1月生,河南南阳人,汉族。中国科学院力学研究所在读博士研究生,主要研究方向为金属材料疲劳探伤。通信地址:北京市海淀区北四环西路15号。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

材料或构件在交变载荷作用下的疲劳破坏过程可以分为以下三个阶段[7]，①裂纹形成阶段；②宏观裂纹扩展阶段；③瞬时断裂阶段。第一阶段裂纹形成前的应力循环称为无裂纹寿命，断裂力学研究内容之一是宏观裂纹扩展阶段的规律，研究由宏观裂纹初始值到发生断裂时裂纹临界值的寿命，即所谓含裂纹材料或构件的剩余寿命。

在裂纹尖端，通常采用应力强度因子 K 描述裂纹尖端的应力状态，其表达式如下[7]

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \tag{1}$$

其中 Y 是一个几何因子，它与裂纹形状有关；a 为裂纹深度；σ 为应力。

如果把含裂纹材料或构件承受交变载荷的循环次数记为 N，应力强度因子幅值记为 $\Delta K = K_{max} - K_{min}$，则宏观裂纹扩展阶段的规律主要涉及两个量，疲劳裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$、疲劳裂纹扩展门槛值 $(\Delta K)_{th}$。一般情况下，$\frac{da}{dN}$ 与 ΔK 的关系曲线在对数坐标平面中可以表示为图 1。

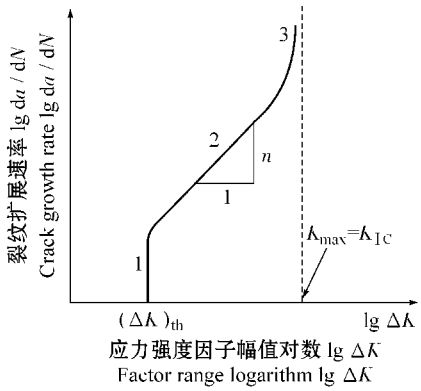

图 1 疲劳裂纹扩展规律

Fig. 1 Fatigue crack growth

在 1 区，存在一个下限值(即是疲劳裂纹扩展门槛值) $(\Delta K)_{th}$，当应力强度因子幅值小于该值时，认为裂纹不扩展，此时材料或构件具有无限寿命；在 2 区，曲线接近于一条直线，可以用下式描述[7]

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m = C(\Delta\sigma Y\sqrt{\pi a})^m \tag{2}$$

其中 C 和 m 是与裂纹扩展速率有关的材料常数。上式是 Paris 公式，此时材料或构件处于有限寿命期；在 3 区，存在一个上限值 K_{IC}，当应力强度因子的大小超过该值时，裂纹迅速扩展，构件将发生断裂。式(2) 中的材料常数 C 和 m 可以通过裂纹扩展实验获得[6,7]。一般用紧凑拉伸或三点弯曲试件测量这两个材料常数。

2.2 抽油杆剩余寿命估算理论

含有尺寸为 (a_0, c_0) 的初始裂纹的抽油杆，如果其应力强度因子幅值 ΔK 超过了门槛值 $(\Delta K)_{th}$，则该抽油杆进入有限寿命期，此时，将裂纹从初始深度 a_0 发展到临界深度 a_c 所经历的循环次数 N 称为该裂纹的剩余寿命。如果已知抽油杆材料常数 C 和 m 以及应力强度因子表达式 K，则可以借助公式(2) 进行积分，从而计算出剩余寿命 N

$$N = \int_0^{a_c} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \tag{3}$$

式中，应力强度因子幅值 ΔK 不但与抽油杆载荷有关，并且随裂纹形状的改变而变化；a_0 假定可以检测到，但是 a_c 却需要通过应力强度因子临界值确定。

从图 2 的抽油杆疲劳裂纹形状可以看到，抽油杆的疲劳裂纹为表面裂纹，形状要用深度方向、横向两个方向的尺度描述。

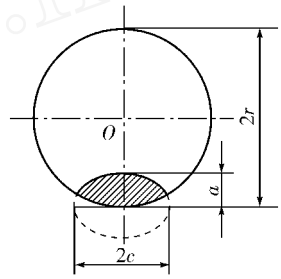

图 2 抽油杆疲劳裂纹前缘形状

Fig. 2 Surface crack of sucker rod

因而裂纹扩展有两个方向的表达式

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_a)^m \qquad \frac{ds}{dN} = C(\Delta K_s)^m \tag{4}$$

那么，裂纹沿两个方向的变化规律为

$$\frac{da}{ds} = \left(\frac{\Delta K_a}{\Delta K_s}\right)^m = \left(\frac{Y_a}{Y_s}\right)^m \tag{5}$$

这样通过 (a_0, c_0) 计算出 Y_{a0} 和 Y_{s0}，然后计算出应力强度因子 K，之后令 $a_1 = a_0 + \Delta a$，从而由公式(5) 计算出 s_1，然后得到 Y_{a1} 和 Y_{s1}。继续重复上述工作，直到 $K = K_c$，然后用数值积分得到剩余寿命 N，此时的裂纹尺寸就是临界值。

3 抽油杆裂纹形状的变化规律研究

3.1 抽油杆疲劳裂纹前缘形状

对于抽油杆，裂纹前缘是一条曲线，裂纹前缘沿各方向的应力强度因子是变化的，准确测定这一规律比较困难，用几何方法测量裂纹前缘的坐标，回归出短半轴为 a、长半轴为 c 的椭圆方程，则两轴之比 a/c(为形状比，即裂纹形貌) 在裂纹扩展过程中会发生变化，研究并掌握抽油杆疲劳扩展过程中表面裂纹 a/c 的变化规律，是估计疲劳寿命的必要前提。李国义[5] 等进行了理论与实验研究，并指出，无论初始化裂纹形状如何，在裂纹扩展过程中裂纹立即椭圆化，形状是等离心率的同心椭圆，因而不管抽油杆初始缺陷多么复杂，开

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

始就可以将其处理为部分椭圆形状。但是,从参考文献看,工作局限在初始裂纹在一个较大的尺寸(通常 $a_0 > 2$ mm),通过相关的研究发现,小裂纹的扩展与剩余寿命才是抽油杆使用过程中最重要和值得关心的。因此这里在前人工作基础上进行初始小裂纹在扩展过程中的形貌研究。

3.2　抽油杆疲劳裂纹扩展实验

为了研究抽油杆杆体疲劳裂纹前缘在裂纹扩展过程中的变化规律,进行一系列抽油杆杆体的疲劳裂纹扩展实验。

3.2.1　实验手段与途径

1) 试件

(a) 采用 ∅22 mm 的抽油杆杆体,按照图 3 尺寸进行加工。

(b) 在试件中部用电火花刻伤(深度约为 0.5 mm)。

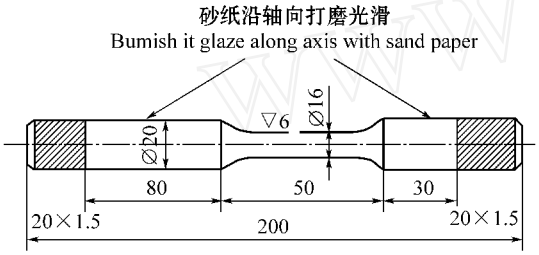

图 3　试件尺寸

Fig. 3　Specimen geometry

2) 实验条件

(a) 实验机为 LETRY(10 吨) 高频疲劳实验机

(b) 平均载荷 32 kN

(c) 载荷幅值 16 kN

(d) 加载频率 120 Hz

3) 实验步骤

(a) 在平均载荷为 32 kN、载荷幅值为 22 kN 条件下预制裂纹。

(b) 按照 2) 中实验条件加载,在实验过程中采用降载勾线法在试件断口上留下裂纹扩展迹线。

(c) 记录勾线时载荷循环次数。

(d) 当在 2) 中实验条件下实验机无法继续加载时,加静载荷拉断试件,并清洗断口备用。

3.2.2　实验结果及主要结论

1) 抽油杆杆体疲劳裂纹前缘将会在扩展时逐步椭圆化,其形状比 a/c 分布于 0.7～0.8 之间(见图 4)。

2) 抽油杆杆体疲劳裂纹前缘形状比 a/c 随着裂纹深度的增加,有逐渐减小的趋势。

3) 在裂纹深度 a 较小时,抽油杆疲劳裂纹前缘形状比 a/c 约为 0.78。

4　抽油杆裂纹超声波监测实验研究

抽油杆上存在的裂纹将会埋下事故隐患,及时发现这些疲劳裂纹并作相应的处理是消除隐患的有效手段。超声波检测作为一种有效的无损检测方法,已经被证明可以用于抽油杆疲劳裂纹的检测。然而,抽油杆的判废并不能根据当时的裂纹深度是否已经超过临界值来判断,而是需要根据检测结果估算该构件将在未来多长时间内仍然能够继续使用(即安全使用期)。因此,需要了解裂纹深度与超声波检测信号之间的关系,以及裂纹扩展过程中超声波信号的变化规律,从而为超声波方法在抽油杆疲劳裂纹无损检测方面的应用提供依据。

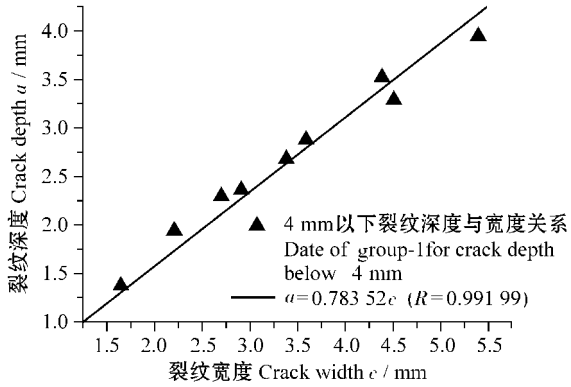

图 4　抽油杆裂纹形状比变化规律

Fig. 4　Crack shape change of sucker rod

为达到上述目的,首先进行裂纹扩展状态下的超声波动态监测实验,得到裂纹扩展过程中超声波信号的大致变化规律;随后,采用间歇方式,每隔一段时间对超声波信号进行静态测量,同时记录该时刻的载荷循环次数。

4.1　实验目的

考察超声波检测信号与抽油杆疲劳裂纹深度之间的关系。考察超声波检测信号与含裂纹抽油杆疲劳寿命的关系。

4.2　实验手段与途径

1) 试件,采用 ∅22 mm 的抽油杆杆体,按照图 3 尺寸进行加工。在试件中部用电火花刻伤(深度约为 0.5 mm)。

2) 实验条件,实验机为 ETRY(10 吨) 高频疲劳实验机,平均载荷 32 kN,载荷幅值 16 kN,加载频率 120 Hz,超声波线聚焦探头焦距 20 mm,焦线宽度 1 mm,检测仪型号为汉威 HS-510。

3) 动态监测实验,在平均载荷为 32 kN、载荷幅值为 22 kN 条件下预制裂纹。按照 2) 中实验条件加载,用计算机自动采集超声波检测到的裂纹信号。

4) 静态监测实验,在平均载荷为 32 kN、载荷幅值为 22 kN 条件下预制裂纹。按照 2) 中实验条件加载,实验过程中每隔一段时间用超声波线聚焦探头测量裂纹信号幅值,同时记录勾线时载荷循环次数。实验过程中

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

采用降载勾线法在试件断口上留下裂纹扩展迹线,并记录勾线前后裂纹的超声波检测信号。当在 2) 中实验条件下实验机无法继续加载时,加静载荷拉断试件,并清洗断口备用。

4.3 实验结果及主要结论

1) 用超声波监测圆棒试件上的疲劳裂纹扩展是可行的,裂纹深度的变化可以反映在超声波信号幅值的变化中。

2) 由于裂纹在卸载之后会发生闭合,因而导致加载、卸载状态下超声波检测信号幅值有差异,因此,在实际的抽油杆裂纹检测过程中,在抽油杆上施加适当的载荷,将有利于疲劳裂纹的探测效果。

3) 超声波检测信号幅值 V 随载荷循环次数的变化趋势,与裂纹深度 a 随载荷循环次数的变化趋势相似,实验结果表明,V 和 a 基本上成线性关系(如图 5)。

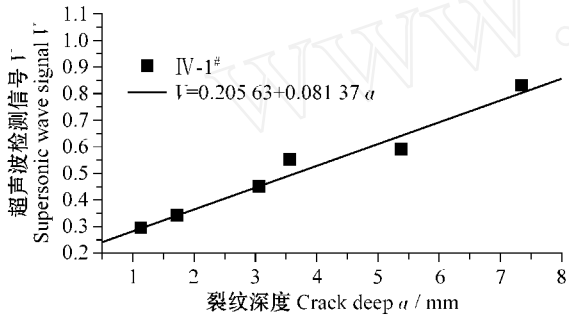

图 5 超声波检测信号与裂纹深度的关系

Fig. 5 Supersonic wave signal and crack deep

5 抽油杆疲劳裂纹剩余寿命估算方法研究

将所有试件的实验数据汇总在图 6 中,得到疲劳裂纹扩展参数平均值

拟合实验数据可以得到 $C = 1.168 \times 10^{-3}$, $m = 1.995\ 95$。

第 Ⅳ组试件在实验过程中同时测量超声波检测信号 V 与载荷循环次数 N,并且从实验数据中发现超声波信号 V 与裂纹深度大致成线性关系,如图 7。这样,通过裂纹深度 a 可以建立 V 与剩余寿命之间 N_f 的关系。首先,需要从第 Ⅳ批试件中得到裂纹扩展参数,

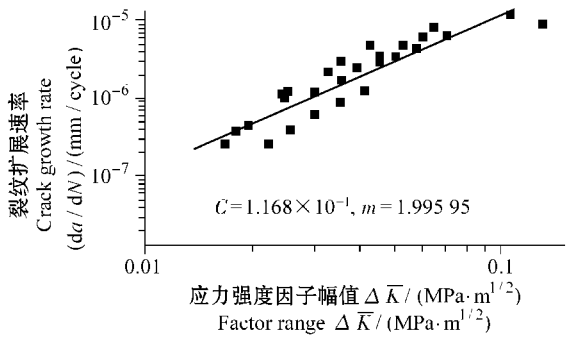

图 6 裂纹扩展速率实验参数拟合

Fig. 6 Experimental results of crack growth rate

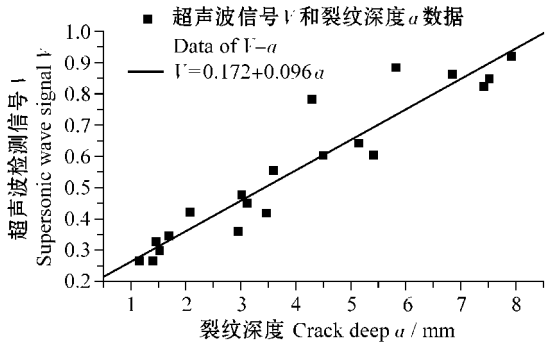

图 7 超声波检测信号与裂纹深度的关系

Fig. 7 Supersonic wave signal and crack deep

如图 7。

有了疲劳裂纹扩展速率参数以及拟合的 V—a 关系,可以得到探伤信号 V 与剩余寿命 N_f 的关系,计算结果如图 8。

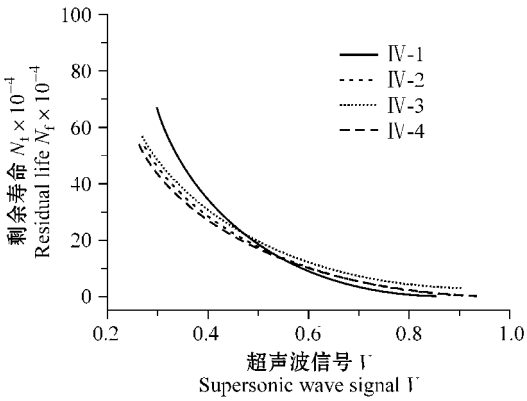

图 8 超声波信号与剩余寿命关系曲线

Fig. 8 Supersonic wave signal and residual life

从图中可以看到,一旦 V 扩展到某一特定的值(此处 > 0.5),其剩余寿命曲线趋于一致的,这说明裂纹扩展一定程度,剩余寿命—探伤信号之间的关系趋于一个单值曲线,不受初始裂纹尺寸与前缘形状的影响。这个结论有助于将探伤仪有效地用到抽油杆的剩余寿命预报中,一个信号对应着唯一的剩余寿命。

6 结论

1) 通过实验,研究抽油杆疲劳裂纹前缘在扩展过程中的变化规律。发现抽油杆杆体疲劳裂纹前缘在扩展时有逐步椭圆化的趋势,裂纹前缘形状比 a/c 分布于 0.7～0.8 之间,在裂纹深度小于 4 mm 时,a/c 可近似为 0.78。

2) 建立超声波信号与抽油杆疲劳裂纹形状之间的关系。结果表明,用超声波检测抽油杆疲劳裂纹是可行的,探伤信号与裂纹尺寸成线性关系。

3) 建立基于超声波无损检测信号的抽油杆剩余寿命估算方法。通过超声波检测信号计算含裂纹抽油杆的剩余寿命,并与实验结果进行对比,预测符合率达

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

84 % 以上。

参考文献(References)

1 钟伯明, 魏嘉荃. 断裂力学在抽油杆缺陷评定中的应用. 北京:石油工业出版社,1993.
ZHONG BoMing, WEI JiaQuan. Applycation of fracture mechanics to evaluate the defect of sucker rod. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993(In Chinese).

2 王国丽, 魏嘉荃. D 级抽油杆 20CrMo 钢疲劳裂纹扩展速率及门槛值. 石油机械,1993,21(7):22～27.
WANG GuoLi, WEI JiaQuan. Fatigue crack growth rate and in D-sucker rod 20CrMo steel. Petroleum Machine, 1993, 21(7): 22～27(In Chinese).

3 张效羽,宋　瑜. 用 Paris 公式处理含表面裂纹抽油杆疲劳断裂问题的研究. 油田地面工程,1994,13(6):58～63.
ZHANG XiaoYu, SONG Yu. Analysis fatigue fracture of sucker rod with surface crack by using Paris formula. Oil Field Ground Engineering, 1994, 13(6):58～63(In Chinese).

4 徐小兵, 周鹤法. 抽油杆表面横向裂纹扩展实验研究. 石油机械, 1996,24(12):20～22.
XU XiaoBing, ZHOU HeFa. Experimental study of surface crack growth in sucker rod. Petroleum Machine, 1996, 24(12): 20～22(In Chinese).

5 李国义, 母丽敏. 抽油杆螺纹段表面的裂纹形貌. 大庆石油学院, 1999, 23(4):50～52.
LI GuoYi, MU LiMin. Surface crack shape in screw section of sucker rod. Daqing Petroleum Institute Journal, 1999, 23(4): 50～52(In Chinese).

6 Paris P C, Erdogan. A critical analysis of crack propagation laws. Trans. ASME, J. Basic Eng., 1963, D85: 528～534.

7 Broek D. Elementary engineering fracture mechanics. Noordhoff: International Publishing, Leyden, 1974.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net