

抽油杆螺纹段表面裂纹应力强度因子实验研究

魏嘉荃 王国丽 钟伯明 张永弘 李 其

(大庆石油学院)

提 要

使用James-Anderson方法,通过实验得到了抽油杆杆头螺纹段带预紧力情况下螺纹根部部分椭圆表面裂纹最深点和表面点的应力强度因子表达式。实验过程中,把20CrMo钢 $\frac{5}{8}$ -英寸抽油杆杆头螺纹段带预紧力的试件,用应变片控制施加的预紧力使之满足工程实际,然后用降载勾线技术描绘出了螺纹根部横截面上缺陷源的疲劳扩展线,由此取得了一系列疲劳裂纹扩展速率数据,并结合疲劳断裂力学标准试样测定的材料性能,得出试件螺纹段螺纹根部部分椭圆表面裂纹最深点和表面点的应力强度因子幅值。再引入这二点应力强度因子正则系数 Y_a 、 Y_s ,又得出一系列相对于表面裂纹形状 $\frac{a}{c}$,和相对深度 $\frac{a}{r}$ 的 Y_a 、 Y_s 数据。再用拟合法得到函数 $Y_a\left(\frac{a}{r}, \frac{a}{c}\right)$ 、 $Y_s\left(\frac{a}{r}, \frac{a}{c}\right)$,于是得出应力强度因子表达式。将表达式用于估算试件的疲劳寿命,估算表明,与实验结果符合。证明表达式的正确性,可以在工程上实用。

关键词:抽油杆螺纹段 表面裂纹 应力强度因子 James—Anderson方法 降载勾线技术疲劳裂纹扩展

1 前 言

实际生产中表明,抽油杆柱的断裂事故,常见的是发生于螺纹段的表面裂纹型缺陷。用断裂力学方法可以对抽油杆螺纹段,进行安全评定,但是,进行这样的工作,首先要知道抽油杆螺纹段带预紧力情况下表面裂纹的应力强度因子表达式。这样一个问题,在理论上求解是十分复杂的,目前还没有这类问题的精确解析解。为了解决抽油杆,以及其他同类工程构件的缺陷评定问题,笔者以James-Anderson方法为基础,通过疲劳裂纹扩展的实验研究,寻求到抽油杆杆头螺纹段在预紧力情况下表面裂纹应力强度因子的近似解答。

2 原 理

1969年,James-Anderson^[1]提出了用疲劳裂纹扩展速率和应力强度因子幅度的关系

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K) \quad (1)$$

通过实验来研究应力强度因子的方法。1981年,Wilhem等^[2]用这种方法研究了板中孔边裂纹和拉杆圆弧表面裂纹的应力强度因子,得到了比较满意的结果。

我们将这种方法用于研究抽油杆杆头螺纹段带预紧力情况下螺纹根部表面裂纹最深点和表面点的应力强度因子, 并将 (1) 式写成Paris公式

$$\left. \begin{aligned} \frac{da}{dN} &= m(\Delta K_{Ia})^n \\ \frac{ds}{dN} &= m(\Delta K_{Is})^n \end{aligned} \right\} (2)$$

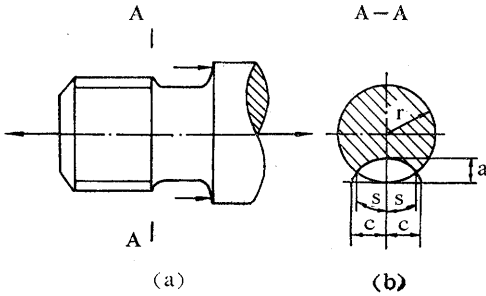


图 1 (a) 试件螺纹段

(b) 螺纹段横截面上表面裂纹

Fig.1 (a) Thread section of a specimen

(b) Surface crack on the cross section in a thread section

式中 m 、 n 是试件材料常数, 由标准试样测定, $m=7.41 \times 10^{-8}$, $n=1.63$; N 是疲劳载荷循环数; ΔK_{Ia} 、 ΔK_{Is} 分别是表面裂纹最深点和表面点的应力强度因子幅度; a 、 s 分别是试件横截面上表面裂纹最深点深度和表面点圆周半弧长, 如图 1 所示。

于是 James-Anderson 方法的应用可用下列方框流程图表达 (图 2)。

3 实验方法

3.1 试件

本实验所用试件是东北输油管理局铁岭机械厂生产的 20CrMo 钢 $\frac{5}{8}$ 英寸 D 级抽油杆杆头螺纹段, 螺纹根部直径 $D=20.66\text{mm}$, 试件结构见图 3。试件制备除机加工外, 主要进行预制切口缺陷及施加预紧力: (1) 预制切口缺陷。用厚度 $0.13 \sim 0.16\text{mm}$ 砂轮机, 先打磨前沿成圆弧形, 然后装在转速为 4000rpm 的立式铣钻磨床上, 在螺纹段的第一扣螺纹根部预制切口成为缺陷源; (2) 施加预紧力为了确定预紧力的大小, 用应变仪控制, 其控制系统见图 3。当拧

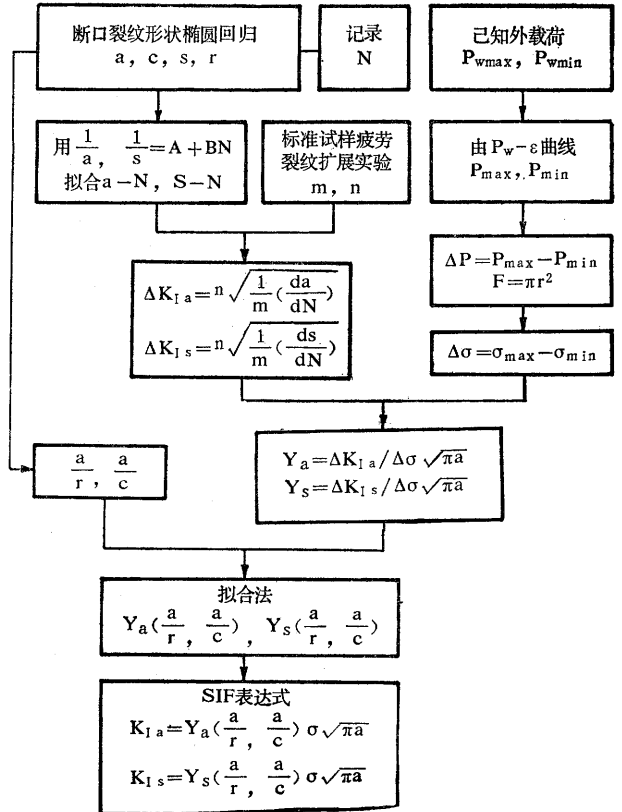


图 2 原理流程方框图

Fig.2 Block process chart of principle

紧接箍时，螺纹段受拉，接箍受压，此时卸载槽处贴的应变片，测得应变值，即可确定初始预紧力 Q_{y0} 。

3.2 疲劳裂纹扩展及降载勾线

将上述制备的试件安装在高频疲劳机上加载 P_w ，此时初预紧力 Q_{y0} 变小，以 Q_{yp} 表示。在外变载 $P_{wmax} \sim P_{wmin}$ 作用下，螺纹段缺陷位置处所荷载荷为 $P_{max} = Q'_{yp} + P_{wmax}$ ； $P_{min} = Q''_{yp} + P_{wmin}$ ，螺纹段缺陷位置处受载幅值

$$\Delta P = P_{max} - P_{min} = \Delta P_w + Q'_{yp} - Q''_{yp} \tag{3}$$

式中 $\Delta P_w = P_{wmax} - P_{wmin}$ 是外载幅值； Q'_{yp} 是最大外载 P_{wmax} 作用下的相应预紧力； Q''_{yp} 是最小外载 P_{wmin} 作用下的相应预紧力。

(3) 式的关系可用图4的原理表达。从图4知， $Q''_{yp} > Q'_{yp}$ ，则从 (3) 式知 $\Delta P < \Delta P_w$ 。这表明，螺纹段通过接箍施加预紧力后，在外载幅值 ΔP_w 作用下，螺纹段实际的应力幅值 $\Delta \sigma$ 小于外载应力幅值 $\Delta \sigma_w$ ，即 $\Delta \sigma < \Delta \sigma_w$ 。试件缺陷源在 $\Delta \sigma$ 作用下产生疲劳裂纹扩展，此时疲劳机的振动频率显示发生变化。当频率显示稳定下降0.1Hz，进行降载勾线，勾线时将最大载

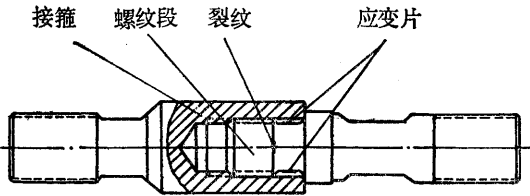


图 3 试件结构及预紧力控制

Fig.3 Specimen structure and control of prestressing force

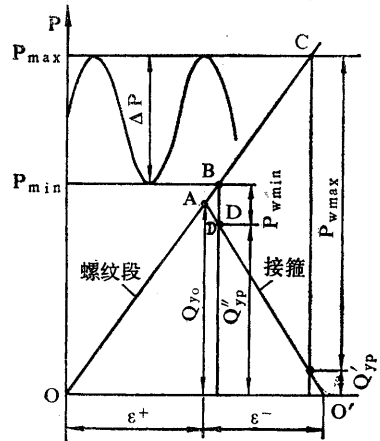


图 4 螺纹段载荷幅值

Fig.4 Load amplitude in the thread section

荷降低 $(\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}) \Delta P_w$ 。第一次勾线在 150×10^3 次左右。以后逐次减小 $10 \sim 20 \times 10^3$ 次。每次勾线完毕后将载荷恢复到最大值，保持整个疲劳裂纹扩展过程中 ΔP 稳定不变。

4 实验数据及分析

经过降载勾线实验得到的试件断口疲劳裂纹扩展线如图5的照片所示。它表明疲劳裂纹扩展线近似部分椭圆，用椭圆方程回归之后得到部分椭圆表面裂纹，典型的如图6所示。从图6中得到的各个椭圆两个半轴长 a 、 c ，以及椭圆与试件表面交点的半弧长 s ，对应的载荷循环数 N ，相应的外加应力幅 $\Delta \sigma_w$ ，裂纹位置应力幅 $\Delta \sigma$ ，均列入表1。表1中的实验测定数据 $a-N$ ， $s-N$ 用双曲线方程

表 1 实验测定及计算数据

Table 1 The data of experimental measurement and Calculation

试 件 号	<i>a</i> (mm)	<i>c</i> (mm)	<i>S</i> (mm)	<i>N</i> (×10 ³ 次)	$\frac{a}{c}$	$\frac{a}{r}$	$\Delta\sigma_w$ (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	<i>Y_a</i>	<i>Y_s</i>
G6—1	5.862	6.727	6.379	0	0.87	0.57	196.1	113.8	1.336	1.472
2	6.627	7.277	7.342	95	0.91	0.64	196.1	113.8	1.589	1.767
3	7.227	7.921	8.001	128	0.91	0.70	196.1	113.8	1.670	1.865
4	7.707	8.574	8.661	151	0.90	0.76	196.1	113.8	1.733	1.942
5	8.021	9.197	9.242	166	0.87	0.78	196.1	113.8	1.781	2.001
6	9.214	11.43	11.23	178	0.81	0.89	196.1	113.8	1.728	1.945
G7—1	7.269	7.148	7.314	0	1.02	0.70	188.0	104.2	1.644	2.051
2	8.246	8.388	8.612	67	0.98	0.80	188.0	104.2	1.858	2.538
3	8.600	8.932	9.165	87	0.96	0.83	188.0	104.2	1.934	2.735
4	9.166	9.921	10.14	104	0.92	0.89	188.0	104.2	1.979	2.892
5	9.685	12.13	11.87	114	0.80	0.94	188.0	104.2	1.990	2.972
G8—1	6.381	7.519	7.505	0	0.85	0.62	196.1	113.8	1.508	1.711
2	6.726	7.464	7.522	35	0.90	0.65	196.1	113.8	1.620	1.851
3	7.094	8.103	8.136	61	0.88	0.69	196.1	113.8	1.705	1.960
4	7.465	8.515	8.557	89	0.88	0.71	196.1	113.8	1.818	2.106
5	7.896	9.147	9.169	107	0.86	0.76	196.1	113.8	1.879	2.190
6	8.429	9.694	9.743	124	0.87	0.82	196.1	113.8	1.933	2.266
7	9.419	11.97	11.65	135	0.79	0.91	196.1	113.8	1.905	2.242
G16—1	6.742	7.698	7.725	0	0.88	0.65	198.7	115.4	1.483	1.739
2	7.239	7.317	7.469	36	0.99	0.70	198.7	115.4	1.579	1.893
3	7.617	7.505	7.696	62	1.01	0.74	198.7	115.4	1.661	2.030
4	7.818	8.418	8.554	82	0.93	0.75	198.7	115.4	1.743	2.167
5	8.294	8.861	9.036	102	0.94	0.80	198.7	115.4	1.806	2.287
6	8.848	10.09	10.17	121	0.88	0.86	198.7	115.4	1.866	2.411
7	9.818	13.65	12.71	138	0.72	0.95	198.7	115.4	1.883	2.483

$$\frac{1}{a}, \frac{1}{s} = A + BN$$

(4)

回归，得到式中的系数*A*、*B*列入表2。

按照本文的原理流程方框图(图2)，计算的应力强度因子正则系数*Y_a*、*Y_s*值也列入表1。
采用拟合法，设应力强度因子的正则系数方程为

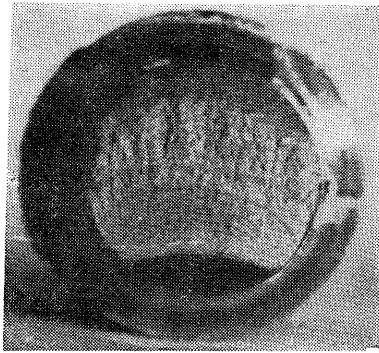


图 5 断口上疲劳裂纹扩展线照片
Fig.5 Photograph of fatigue crack propagation on the fracture

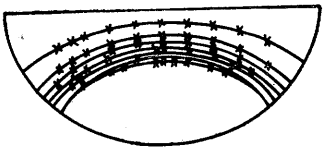


图 6 典型部分椭圆表面裂纹
Fig.6 Typical part elliptical surface crack

$$Y_{a,s}\left(\frac{a}{r}, \frac{a}{c}\right)=b_0+b_1\left(\frac{a}{r}\right)+b_2\left(\frac{a}{c}\right)+b_3\left(\frac{a}{r}\right)^2+b_4\left(\frac{a}{r}\right)\left(\frac{a}{c}\right)+b_5\left(\frac{a}{c}\right)^2 \tag{5}$$

利用表1有关数据，在微机上计算之后，得（5）式中*i*系数*b_i*(*i*=0, 1,2,3,4, 5)列入表3。

表 2 (4)式中的A、B系数
Table 2 Coefficient A, B in the equation (4)

试 件 号	回 归 曲 线	回 归 系 数		相关系数 r
		A	B(×10 ⁻⁷)	
G6	a-N	0.1750	-3.164	0.9598
	s-N	0.1551	-2.905	0.9063
G7	a-N	0.1388	-2.867	0.9866
	s-N	0.1398	-4.150	0.9578
G8	a-N	0.1603	-3.454	0.9713
	s-N	0.1403	-3.238	0.9314
G16	a-N	0.1503	-3.159	0.9933
	s-N	0.1804	-4.796	0.9953

表 3 *b_i*(*i*=0, 1, 2, ……5)系数
Table 3 Coefficient *b_i*(*i*=0, 1, 2, ……5)

系数 位置	<i>b</i> ₀	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>b</i> ₃	<i>b</i> ₄	<i>b</i> ₅
裂纹最深点	-1.777	7.881	0	-4.203	0	0
裂纹表面点	-0.2574	0	0	0	3.848	-0.4141

至此，得到了抽油杆杆头螺纹段带预紧力情况下螺纹根部部分椭圆表面裂纹最深点和表面点的应力强度因子表达式，分别为

$$K_{Ia}\left(\frac{a}{r}, \frac{a}{c}, \sigma\right) = \left[-1.777 + 7.881\left(\frac{a}{r}\right) - 4.203\left(\frac{a}{r}\right)^2\right] \cdot \sigma \sqrt{\pi a} \tag{6a}$$

$$K_{Is}\left(\frac{a}{r}, \frac{a}{c}, \sigma\right) = \left[-0.2574 + 3.848\left(\frac{a}{r}\right)\left(\frac{a}{c}\right) - 0.4141\left(\frac{a}{c}\right)^2\right] \cdot \sigma \sqrt{\pi a} \tag{6b}$$

式中 $0.57 \leq \frac{a}{r} \leq 0.95, 0.72 \leq \frac{a}{c} \leq 1$

为了检验（6）式是否正确，我们用它变成应力强度因子幅度计算了试件的剩余寿命。将剩余寿命计算值 N_i 和实验值 N_s 列入表4。表明计算值与实验值符合，证明得到的应力强度因子表达式是正确的，可以用于工程实际。

表 4 试件剩余寿命计算值和实验值比较

Table 4 Compare the estimation values with experiment values on remaining life of samples

剩余寿命	方 向	试 件 号			
		G6	G7	G8	G16
N_i (10^6)	a	176.8	112.6	142.6	129.2
	s	166.6	117.6	136.0	131.5
N_s (10^6)	a, s	178.0	114.0	135.0	138.0
误 差 (%)	a	-0.670	1.20	5.60	-6.38
	s	-6.40	3.16	0.740	-4.70

5 结 论

在抽油杆杆头螺纹段带预紧力的螺纹根部表面裂纹这种复杂情况下，仍然可以用降载勾线技术在横截面上描绘出清晰的疲劳裂纹扩展线，得到应力强度因子。表明James-Anderson方法用于确定三维裂纹应力强度因子是一个有效的工具，可以推广应用于其他某些复杂的三维裂纹体问题。

其次，抽油杆杆头螺纹段施加预紧力后，在外加变载荷作用下，螺纹根部实际应力幅值低于外载应力幅值，从而降低了应力强度因子幅值，提高了螺纹段剩余寿命，在本文的情况下约1.5倍。

（本文收到日期1991年6月11日）

（编辑 王治同）

参 考 文 献

- (1) James L A and Anderson W E. A Simple experimental procedure for stress intensity factor calibration. *Engineering Fracture Mechanics*, 1989(1).
- (2) Wilhem D et al. An empirical approach to determining K for surface cracks. *ICF5*, 1981, (1).

AN INVESTIGATION ON STRESS INTENSITY FACTOR IN SUCKER ROD THREAD SECTION WITH SURFACE CRACK

Wei Jiaquan Wang Guoli Zhong Boming Zhang Yonghong Li Qi

(*Daqing Petroleum Institute*)

Abstract

By using James-Anderson's method, we obtained experimentally the expression of stress intensity factor on the deepest point and surface point of partly elliptical surface crack on the root of thread section of sucker rod head in the case of pre-stressing. During the experiment, samples of 20CrMo steel 5/8" sucker rod head thread section with pre-stressing were used and the pre-stress applied to the samples were controlled by a strain gage to model needs of engineering. Then, by using marking techniques to delineate the fatigue crack propagation of the source of defect on the cross section of a thread root, a series of data on crack fatigue crack growth rates were obtained. By combining them with material properties with standard specimens in fatigue fracture mechanics testing, the stress intensity factor amplitudes on the deepest point and surface point of a partially elliptical surface crack of thread section root of the samples were obtained. We introduced the normalized coefficient Y_a , Y_s of stress intensity factor on the two points to obtain a series of data Y_a , Y_s corresponding to surface crack shapes a/c and relative depth a/r . Finally, by means of matching technique the functions $Y_a(a/r, a/c)$, $Y_s(a/r, a/c)$ were obtained. The expressions used for estimating the fatigue life of the samples, and the estimate agrees with experimental results. The expressions of stress intensity factor obtained in this paper are reasonable, and can be applied to engineering practice.

作 者 简 介

魏嘉荃, 女, 1936年出生。1960年毕业于北京石油学院机械系。现任大庆石油学院机械系高级工程师。通讯处: 黑龙江省, 安达市, 大庆石油学院, 机械系, 邮政编码: 151400。