

激光散斑法探测水中微小位移

王云山 刘业厚 王明吉 傅石友
(大庆石油学院基础部, 安达市 151400)

摘要 提出用光纤阵列传像及光通道法的激光散斑照相术探测水中构件上横向微小位移的测试方法, 测量精度达 4%。

关键词 光纤阵列传像, 光通道, 微位移

1 引 言

海洋石油的勘探与开发, 推动了水中探测技术的发展。我们提出用光纤阵列传像及光通道的激光散斑照相术探测水中构件上横向微小位移的测试方法, 并结合 SCOD (Surface crack opening displacement) 法^[1]测量了 16MnR 钢构件上表面裂纹的应力强度因子 K_I 。

利用光纤阵列传像的激光散斑照相术探测水中微小位移的方法, 在恒温静水中测量精度达 4%。在水面上 1 m 高处以每秒 0.2 滴的滴定速率扰动下, 拍摄水中面内微小位移的双曝光散斑图, 其干涉条纹仍可以分辨并能实现测量。结合 SCOD 法, 测量了水中 16MnR 板试件半椭圆表面裂纹的应力强度因子 K_I , 并与 Newman-Raju^[2] 解进行了比较。两者符合得很好。

利用光通道的激光散斑照相法, 也可以用于水中构件上面内微小位移的测量, 精度达 4%。与上法不同的是用一管道传光, 因而简单, 但被测点距离太短(半米左右)。用这种方法测量了内充油的球形容器内半椭圆表面裂纹中心的张开位移, 结合 SCOD 法测量了 16MnR 球形容器内半椭圆表面裂纹的应力强度因子 K_I , 并与 Schmitt-Keim^[3] 解进行比较。两者符合得很好。

2 实验原理与技术

2.1 用光纤阵列传像法探测水中微小位移

实验装置如图 1, 试件被置于 $100 \times 100 \times 200 \text{ mm}^3$ 的有机玻璃水箱中, 水箱盛有清水至淹没试件。试件的测试区涂以玻璃微珠以增加反光, He-Ne 激光用透镜 L 馈入光纤传光束, 导入水中垂直照射试件被测区域

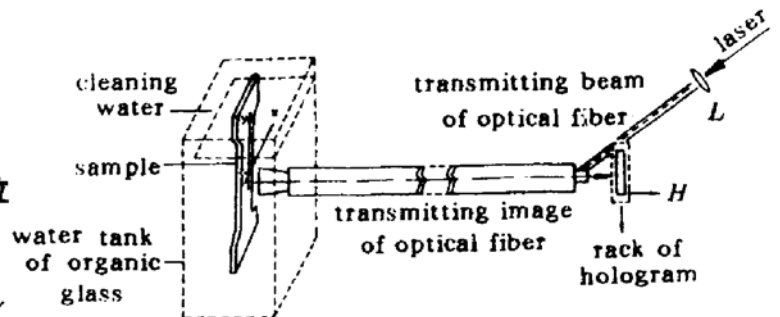


Fig. 1 Small displacement measuring in the water by the speckle photography of optical fiber array image

上。被测区散射光经 G_{101} 大截面光纤传像束传到干板 H 上,并调整到光纤单元成像和综合成像重合于 H 之上。而光纤传像束和光纤传光束以不锈钢网保护。

16MnR 板试件的结构如图 2(a) 所示,试件中部用片砂轮精心制作一个半椭圆表面裂纹(图中短线①),裂纹的结构如图 2(b)。预制疲劳裂纹由 10 T 程控疲劳机产生。最大载荷 $P_{\max} = 1.4 \times 10^3 \text{ N}$,最小载荷 $P_{\min} = 1.4 \times 10^2 \text{ N}$,频率为 102 Hz。经过一定疲劳循环后,用读数显微镜观察表面裂纹 C 向情况。用图 1 所示装置测量在拉伸载荷下的表面裂纹中心张开位移。

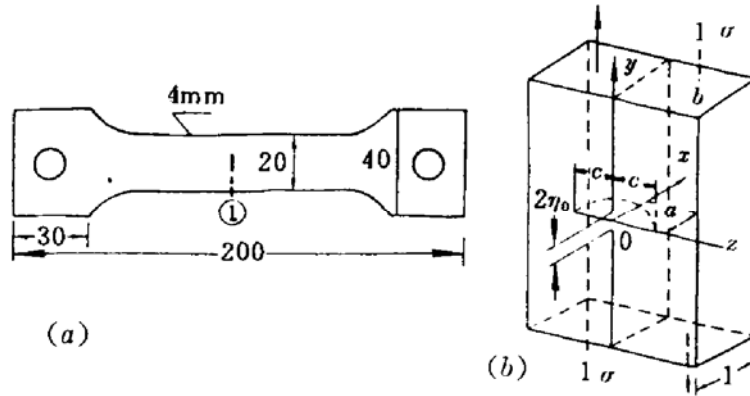


Fig. 2

(a) Structure of 16MnR plate sample; (b) Structure of surface crack

由断裂力学知,拉伸板试件表面半椭圆裂纹应力强度因子^[1]

$$K_I = M_1 M_2 \sigma (\pi a / c Q)^{1/2} (a^2 \cos^2 \theta + C^2 \sin^2 \theta)^{1/4} \quad (1)$$

令 $M = M_1 M_2$, M_1 , M_2 分别是前后自由表面影响系数, σ 是垂直于裂纹面的平均分布压力, Q 是几何形状因子, a 是裂纹的深度, C 是裂纹的半长度, θ 是半椭圆裂纹边缘上一点与 z 轴(见图 2(b)) 的夹角。 M 与半椭圆裂纹中心张开位移之半 δ 的关系为

$$M = E \delta Q^{1/2} / [2(1 - \mu^2) a \sigma]$$

式中 E 是材料的杨氏弹性模量, μ 是材料的泊松比。

2.2 利用光通道的激光散斑照相法

利用光通道的激光散斑照相法要通过多层介质测量,原理如图 3 所示。用 He-Ne 激光细光束垂直照射待测物表面某定点附近 $3 \sim 5 \text{ mm}^2$ 的小区域,其上任意点 $S(x_0, y_0)$ 反射光通过折射率分别为 n_1 , n_2 及 n_3 的多层介质由成像系统成像于像平面上 $P_i(x_i, y_i)$ 点。根据几何光学原理,当满足近轴光学条件且空气折射率取为 $n_3 = 1$ 时,定义当量物距: $d_0 = d_2/n_1 + t/n_2 + d_1$ 。令两次曝光之间物体沿 x 轴方向位移 δ_x ,则像面上散斑位移量 $\delta_i = k \delta_x$,式中 $K = d_1/d_0$ 为系统的横向放大率。在线性记录的情况下,测得杨氏条纹间距为 Δ ,则得 x 方向位移量为^[4]

$$\delta_x = L \lambda / K \Delta \quad (2)$$

式中 λ 是所用激光波长, L 是底片 H 到屏的距离。

表面裂纹应力强度因子 K_I 的测量使用 SCOD 法,应力强度因子 K_I 与受内压球形容器内表面裂纹中心张开位移 δ_0 的关系为^[1]

$$K_I = M_s (\sigma + p) [\pi a / (c Q)]^{1/2} (a^2 \cos^2 \theta + c^2 \sin^2 \theta)^{1/4} \quad (3)$$

式中 M_s 是自由表面、曲率等综合影响系数。对于 16MnR 钢材取杨氏模量 $E = 2.1 \times 10^{11} \text{ Pa}$,泊松比 $\mu = 0.3$,则

$$M_s = 5769 Q^{1/2} / (a \sigma)$$

式中裂纹中心张开位移

$$\delta_0 = \delta_1 - \delta_2 = (L\lambda/K)(1/\Delta_1 - 1/\Delta_2)$$

式中 δ_1, δ_2 分别为裂纹中心点附近两边缘对称点的位移量。 Δ_1 和 Δ_2 分别为相应的杨氏条纹间距。所用含内表面裂纹带光通道的半球形夹套式结构的球罐试件,如图 4 所示。

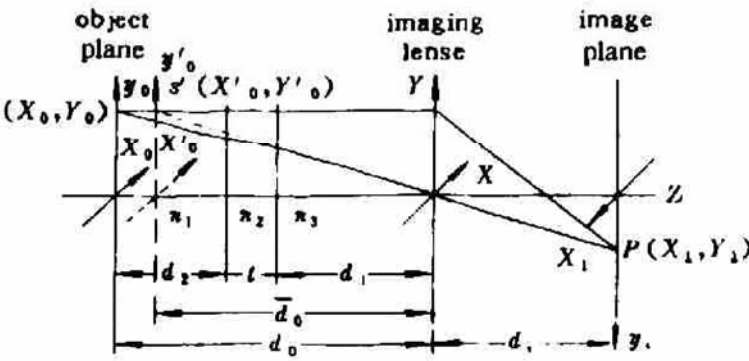


Fig. 3 Speckle photography to measure the cross-displacement through the multi-layer medium

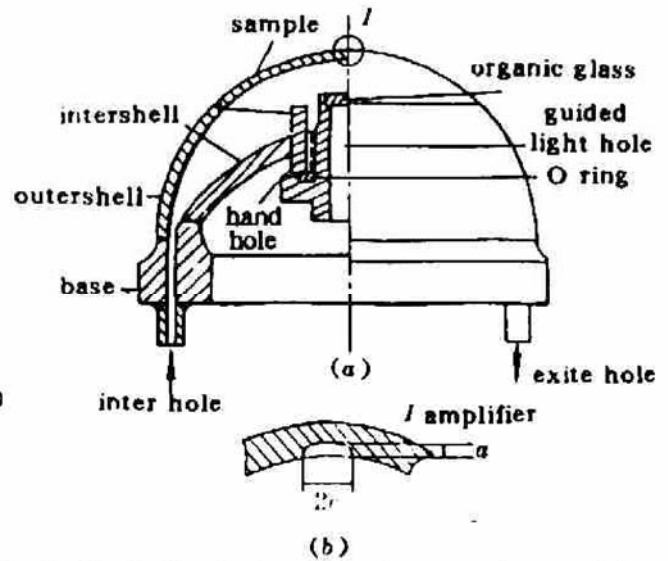


Fig. 4 The half spherical, interlayer sample containing internal surface crack with optic-channel

3 实验结果与讨论

3.1 用光纤列阵传像法探测水中微小位移

水中微小位移测量装置的标定是在一个精确的光学微动小平台(精度 0.5%)的控制下完成的。在每两次曝光之间,精心微调小平台使试件横向位移 $1 \mu\text{m}$ 。把双曝光散斑图用逐点法测量,取十个测量值,每个值反复测 4 次,其平均值见表 1,最大误差不超过 4%。双曝光散斑图的干涉条纹照片如图 5 所示。

我们把板试件测试结果与 Newman-Raju 解进行了比较,其中一个裂纹的情况如图 6 所示。

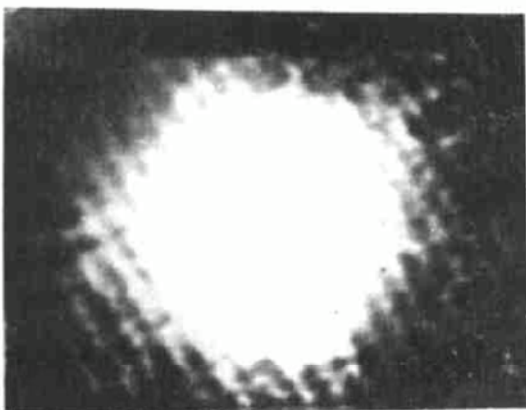


Fig. 5 The interference fringe of a specklegram of small displacement under static water

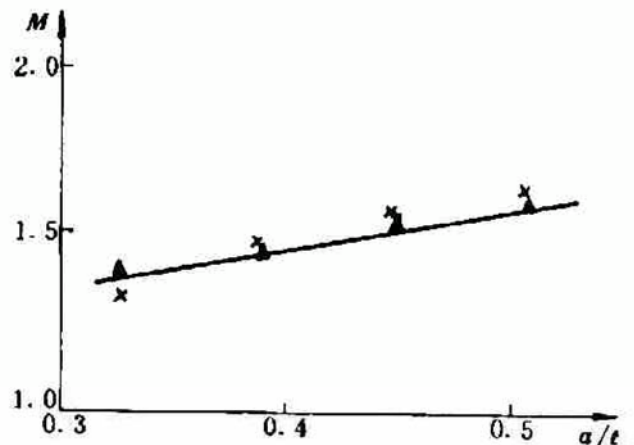


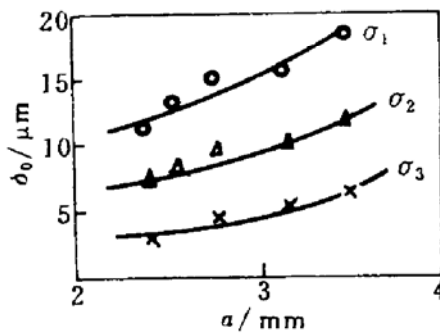
Fig. 6 Comparison of the measured results and the calculations of Newman-Raju the experiment measuring value; Δ value of Newman-Raju solution

Table 1

ΔX (μm)	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10
Δ_0 (μm)	0.971	0.980	0.972	0.968	0.970	0.983	1.034	0.967	0.989	0.979

3.2 利用光通道的激光散斑照相法

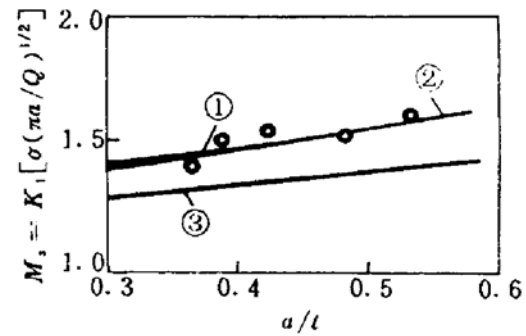
本实验用手压泵加载,应变仪监控,采用逐点分析法测量,数据处理图示于图7中,由图中曲线可以看出,测量结果稳定。把表面裂纹中心张开位移换成 K_I (或 M_s) 并和 Newman-Raju 解及 Schmitt-Keim 解进行比较,示于图8。可以看出本实验方法和 Schmitt-Keim 解符合得很好。

Fig. 7 $\Delta_0 \sim a$ curve for varying δ

$$\sigma_1 = 1.927 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\sigma_2 = 1.285 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\sigma_3 = 6.423 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Fig. 8 $M_s \sim a/t$ curve

1 Curve of Schmitt-Keim solution

2 Experiment curve

3 Curve of Newman-Raju plate solution

实验表明,用光纤列阵传像的散斑照相术和利用光通道的激光散斑照相法探测水中微小位移的测量方法,能达到工业测量的要求。

参 考 文 献

- 1 杨芳毓. 机械工程学报, 1985, 21(3): 34~43
- 2 I. S. Raju et al. . *Eng. Frac. Mech.*, 1979, 11: 817~829
- 3 Schmitt. W., Keim. E. . *The Int. J. of PVP*, 1979, 7(2): 105~118
- 4 J. C. 丹蒂 编. 激光斑纹及有关现象, New York, 1979, 240

A Laser Speckle Method to Measure Small Displacement in Water

Wang Yunshan Liu Yehou Wang Mingji Fu Shiyou

(Fundamental Department, Daqing Oil Institute, Anda 151400)

Abstract A method of measuring small displacement of objects in water by using laser speckle photography through the optic-channel and fiber-optic array image.

Key words fiber-optic array image, optic-channel little displacement