

用激光散斑剪切干涉法对薄壁 压力容器的无损探伤

常延馥 杨光明 张循良

(郑州工学院)

提 要

本文用激光散斑剪切干涉法对薄壁压力容器进行无损检测,得到清晰位移梯度等值条纹图,且条纹趋势与力学分析结果相符合。并通过双曝光全息干涉法得以验证,用上述办法得到的缺陷位置是准确的。

主题词: 散斑剪切干涉法, 薄壁压力容器, 全场位移梯度等值条纹。

一、前 言

目前,对压力容器的无损探伤,大部分是采用超声探伤、X射线探伤。但它们探伤面积较小,而被测表面需进行一定的表面处理才可进行检测。

用散斑剪切干涉照像法探伤,检测面积可以通过增大照明面积而加大,且被测表面可不需特殊处理,另外还具有精度高、可靠性强、设备简单,防震条件要求不高、非接触直接测取全场位移导数等独特优点。

本实验就是用散斑剪切干涉照像法对内表面有人工缺陷的薄壁压力容器进行无损探伤,得到条纹图与力学分析情况相符,其缺陷位置也与用全息干涉法测得的一致。

二、散斑剪切干涉原理

散斑剪切干涉法是1979年由美籍华人Y. Y. Hung提出的〔1〕,基本光路如图1所示。被测物体被激光光源S照明,其反射光经剪切照像机成像在全息干板上。剪切照像机是普通像机物镜前加一小光楔,使它复盖一半物镜而构成的。

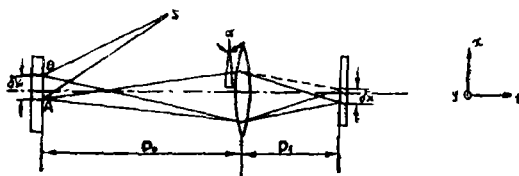


图1 散斑剪切干涉光路图

由图1,物表面上任一点的反射光线经光楔后发生偏移,在象平面的偏离量为:

本文1987年2月28日收到

$$\sigma_{x'} = D_i (\mu - 1) \cdot \alpha \quad (1)$$

式中, D_i ——象距, μ ——光楔折射率, α ——光楔角。

偏离量 $\delta_{x'}$ 折算到物平面上的剪切量为:

$$\delta_x = \delta_{x'} (D_0 / D_i) = D_0 (\mu - 1) \alpha \quad (2)$$

式中, D_0 ——物距, $\frac{D_i}{D_0}$ ——相机放大率。

根据干涉的概念, 研究物表面A点与邻近点B在象平面上的干涉现象。设A、B二点在物体未受载荷之前进行第一次曝光, 在底片上由A、B二点在象平面上所产生的光波复振幅为:

$$\begin{aligned} U_A(x, y) &= ae^{i\varphi_0(x, y)} \\ U_B(x + \delta_x, y) &= ae^{i\varphi_0(x + \delta_x, y)} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 a 为光波振幅, $\varphi_0(x, y)$ 和 $\varphi_0(x + \delta_x, y)$ 分别为A、B两点的位相。在象平面的底片上得到的象光场复振幅为:

$$U_T = U_A + U_B \quad (4)$$

其光强为:

$$\begin{aligned} I_T &= U_T \cdot U_T^* = 2a^2 \{1 + \cos[\varphi_0(x + \delta_x, y) - \varphi_0(x, y)]\} \\ &= 2a^2 [1 + \cos\beta] \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\beta = \varphi_0(x + \delta_x, y) - \varphi_0(x, y)$ 为由物表面形状所决定的位相角。

同理, 当物体被加载后进行第二次曝光, 在底片上由A、B两点产生的光强为:

$$I_T' = 2a^2 [1 + \cos(\beta + \Delta)] \quad (6)$$

式中, $\Delta = \delta(x + \delta_x, y) - \delta(x, y)$ 为因变形引起A、B两点的相对位相差。而 $\delta(x + \delta_x, y)$ 和 $\delta(x, y)$ 分别为A、B两点因变形引起的位相差。

当双曝光是在全息干板乳胶的线性工作区进行时, 则两次曝光的光强可以线性叠加:

$$I = I_T + I_T' = 4a^2 [1 + \cos(\beta + \frac{\Delta}{2}) \cos \frac{\Delta}{2}] \quad (7)$$

式(7)表明光强是由一个直流分量及一个由低频因子 $(\cos \frac{\Delta}{2})$ 所调制的高频载波项

$\cos(\beta + \frac{\Delta}{2})$ 之和。

当 $\Delta = (2n + 1)\pi$ 时高频载波项为零, 只有直流分量存在。为观察条纹, 采用激光或白光的付里叶滤波法提取信息〔2〕。其光路如图2。

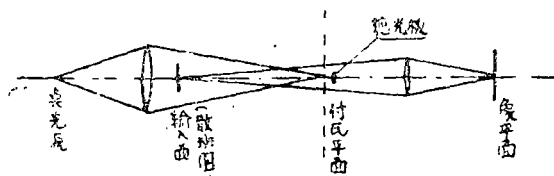


图2 付里叶滤波光路图

付里叶滤波分离了散斑图上记录的各种频率成份, 通过在潜平面上放一遮光板用来挡住

零频成份。在付局象平面上只剩第二项, 它按频率自低到高, 逐渐远离光轴。在 $\cos \frac{\Delta}{2} = 0$ 处出现暗条纹。

下面进行条纹分析。

位相差与物变形关系可以由图 3 导出。

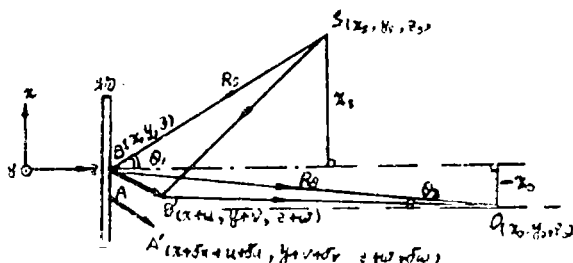


图 3 光程图

文献 [1] 推导了位相差 Δ 与光程差的关系式:

$$\Delta = \delta(x + \delta_x, y) - \delta(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} [A\delta_u + B\delta_v + C\delta_w] \quad (8)$$

式中,

$$\begin{cases} A = \frac{x - x_0}{R_0} + \frac{x - x_s}{R_s} \\ B = \frac{y - y_0}{R_0} + \frac{y - y_s}{R_s} \\ C = \frac{z - z_0}{R_0} + \frac{z - z_s}{R_s} \end{cases} \quad (9)$$

在图 3 光路中, $y_0 = y_s = 0$

当 $x, y, z, \ll R_0, R_s$ 时, 则有 $\frac{x}{R_0}, \frac{y}{R_0}, \frac{z}{R_0}, \frac{y}{R_s}, \frac{z}{R_s}$ 近似取为零。这时

$$\begin{cases} A = -\frac{x_0}{R_0} - \frac{x_s}{R_s} = \sin\theta_2 - \sin\theta_1 \\ B = 0 \\ C = -\frac{z_0}{R_0} - \frac{z_s}{R_s} = -(\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \end{cases} \quad (10)$$

将上式代入 (8) 中, 并作 δ_x 变换,

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left[(\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \frac{\delta w}{\delta_x} + (\sin\theta_1 - \sin\theta_2) \frac{\delta u}{\delta_x} \right] \cdot \delta_x$$

当 δ_x 足够小时, 位移的变分用微分表示:

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left[(\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \frac{\partial w}{\partial x} + (\sin\theta_1 - \sin\theta_2) \frac{\partial u}{\partial x} \right] \cdot \delta_x$$

将 $\Delta = (2n+1)\pi$ 代入上式: (11)

$$\frac{(2n+1)}{2} \lambda = \left[(\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \frac{\partial \omega}{\partial x} + (\sin\theta_1 - \sin\theta_2) \frac{\partial u}{\partial x} \right] \cdot \delta x$$

当 $\theta_1 = \theta_2 = 0$ 时 (12)

$$\frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{(2n+1)\lambda}{4 \cdot \delta x} \quad (13)$$

用两种角度拍照 ($\theta_1 = \theta_2 = 0$; $\theta_1 \neq 0, \theta_2 \neq 0$) 可得两组条纹值, 代入(12)、(13)式, 可联立解出 $\frac{\partial \omega}{\partial x}$, $\frac{\partial u}{\partial x}$ 。

使照明光源 s 和相机同在 yoz 平面内, 使相机对 x 方向剪切, 用上述方法便可求出 $\frac{\partial v}{\partial x}$ 。

将光楔绕 z 轴旋转 90° ; 使相机对 y 方向剪切, 用上述方法可求出 $\frac{\partial \omega}{\partial y}$, $\frac{\partial v}{\partial y}$ 。根据以上所求数值便可得到 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ 。

三、试件及实验方法

本实验试件有二个;

(1) $\phi 100\text{mm}$ 、高 180mm 、壁厚为 0.7mm , 材料为普通白铁的铁筒。在内壁作人工缺陷, 在其内侧表面减薄面积为 $10 \times 7\text{mm}^2$, 减薄度为 0.1mm 。

(2) 37—55 不锈钢炮弹筒, 壁厚为 1mm , 材料为 45# 低碳不锈钢, 在距弹口 70mm 处刻一炮弹纵向方向的沟槽。沟槽长 200mm , 宽 2mm 、深 0.5mm 。

实验采取液压加载。加载前后分别作两次曝光, 都记录在剪切散斑扣机的全息干板上。经 D—19 显影液显影, F—5 定影液定影, 获得双曝光剪切干涉条纹图的负片。将负片置于付里叶滤波光路中提取信息, 在谱平面用海鸥 DF—135 相机离轴拍摄, 即得到带有应变信息的条纹图。此条纹图是全场位移梯度等值条纹图, 它反映了应力分布情况。从应力分析可知, 有缺陷部位在受压情况下应力比较集中, 而且反映在全场带应变信息的条纹图中, 将有畸变条纹, 故可通过识别条纹的办法来判别缺陷位置。实验装置如图 4 所示。

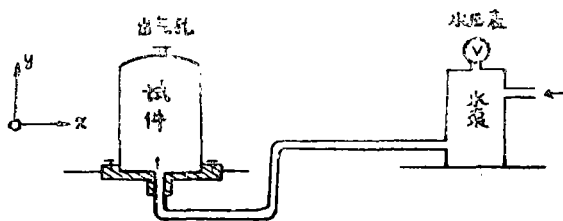


图 4 实验装置图

实验分三部分;

(一) 首先使剪切干涉相机对 y 方向如图 4 所示剪切, 加载量由小到大逐渐增加, 依次记录在各种不同载荷下的剪切散斑干涉条纹图。

试件(1)加载量在0.25—1 kg, 试件(2)加载量在2—5 kg区间时, 在有缺陷表面均显示清晰蝴蝶形条纹。並每个试件在不同载荷下各有一致的条纹趋势, 仅随加载量的增加条纹变密。加载量过大, 条纹过密。

(二)使相机对x方向(试件的轴向方向)剪切。重复以上作法, 在不同载荷下条纹图均不明显。

(三)为证实条纹异样部位是否准确反映缺陷位置, 对试件(2)用双曝光全息干涉法对前面实验中已显示出花样条纹位置拍摄全息干涉图。

四、实验结果

图5是试件(1)加载量为0.73kg时, 二种方向的剪切干涉条纹图。图(a)为y向剪切, 图中呈蝶形条纹的中心位置为缺陷位置。图(b)为对x方向剪切, 图中白线为在试件有缺陷表面所作标记, 图中条纹不明显。由图可见在同样载荷下, 圆柱形压力容器受压时在有缺陷表面, 其横向(y向)位移梯度较大、受应力较集中。而纵向(x向)受力变化不大。此结果与力学分析圆柱形容器受压时, 径向应力较之纵向应力大的分析相符。

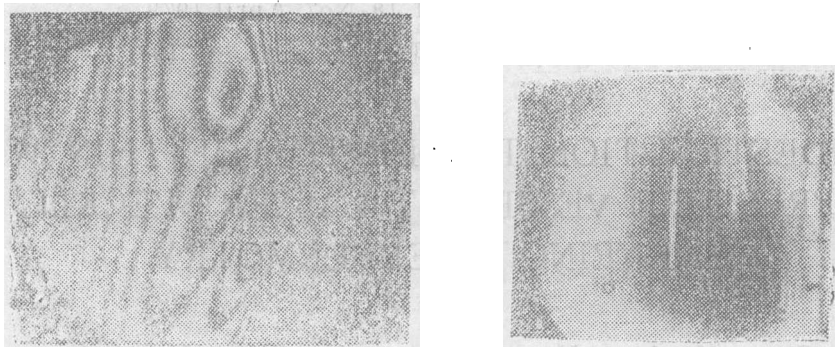


图5 件试(1)加载量为0.73kg时

(a) y向剪切的剪切干涉条纹图

(b) x向剪切的剪切干涉条纹图

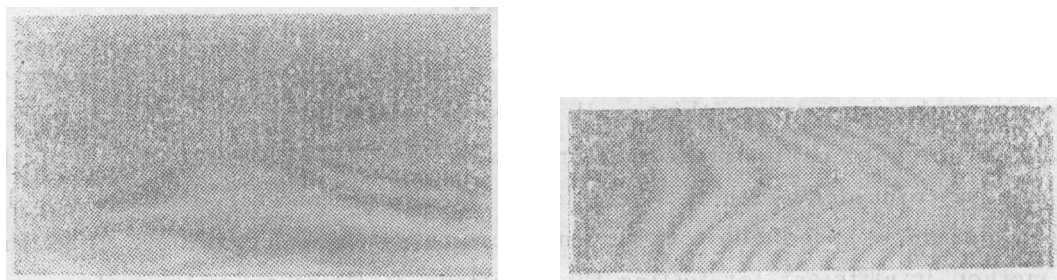


图6 试件(2)加载量为4.2kg时

(a) x向剪切的剪切干涉条纹图

(b) 双曝光全息干涉条纹图

图6是试件(2)加载量同为4.2kg条件下, 对同一表面位置、由二种不同方法记录的条纹图。图(a)中呈双环形条纹中间部位(有密集平行条纹处)为缺陷位置。图(b)平滑条

纹奇变处显示缺陷位置。它表明二种方法所记录条纹图所示的缺陷位置能很好相符。由于剪切干涉条纹图是反应位移梯度等值线,而全息干涉条纹图是反应位移等高线,所以两图的条纹趋势不同是完全正确的。

五、结 束 语

本实验的目的是试图利用近代光测法的优点,将它应用于厚壁高压容器的无损检测。此方法若能得以成功,将会在军工、化工等建设方向得以广泛应用,所以这是一个吸引人、有实际应用价值的课题。本文对薄壁压力容器作了初步探索性实验。实验表明还是大有希望的。当然要定量地得到缺陷的尺寸,还有很多困难、尚需进一步探讨。

参 考 文 献

- [1] Y·Y·Hung. "Image—Shearing camera for direct measurement of surface strains" *Applied Optics* vol.18 No7 April 1979
[2] (美) J.C.Dainty 激光斑纹及有关现象 科学出版社 1981

NONDESTRUCTION TESTER TO THE THIN WALL PRESSURE VESSEL BY LASER SPECKLE SHEARING INTERFEROMETRY

Chang Yanfu Yang Guangming Zhang Xunliang
(Zhengzhou Institute of Technology)

Abstract

Laser speckle shearing interferometry was employed in this paper to test nondestructively a thin wall pressure vessel and clear displacement gradient equal value fringe patterns were obtained. The tendency of the fringes coincided with the results by mechanics analysis and the results by double exposed holographic interferometry, which indicate that this method is efficient for testing the positions of flaws on wall of thin wall pressure vessels.

keywords: Laser speckle shearing interferometry, thin wall pressure vessel, displacement gradient equal value fringe patterns of entire field.