

文章编号: 1001-3806(2012)04-0548-05

## 离面位移数字散斑干涉系统测量材料内部缺陷

许星, 王开福\*, 顾国庆, 梁智锦

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016)

**摘要:** 为了实现对材料内部较深层缺陷的大小和深度的检测, 采用弹性理论分析并结合离面位移数字散斑干涉实验的方法, 分析了含内部缺陷试件的离面位移分布, 并给出了理论解。同时用数字散斑干涉和数值仿真得出试件的离面位移, 将3种方法得到的离面位移及其1阶导数的分布做了对比, 由对比结果可知, 理论、实验及仿真得到的结果非常吻合, 并对误差做了分析。从实验得到离面位移的1阶导数可获得缺陷的大小, 结合理论计算出缺陷的深度, 二者的误差都在允许范围之内。结果表明, 利用离面位移数字散斑干涉系统测量材料内部较深层缺陷具有很高的准确性。

**关键词:** 信息光学; 数字散斑干涉; 数字图像处理; 缺陷检测

中图分类号: O348.11 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.04.029

## Measurement of internal material flaws based on out-of-plane displacement digital speckle pattern interferometry

XU Xing, WANG Kai-fu, GU Guo-qing, LIANG Zhi-jin

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to detect the size and depth of an internal deep flaw in materials, combining out-of-plane displacement digital speckle pattern interferometry (DSPI) with elasticity theory, the out-of-plane displacement distribution of a plate with an internal flaw was analyzed. Then it was verified by numerical simulation and DSPI. The out-of-plane displacement curves and its first-order derivative curves obtained by the above three methods were compared with each other. It was shown that results obtained from these three methods were in good agreement. The experimental error was analyzed. Finally, the flaw size was calculated from the first-order derivative of the out-of-plane displacement. Both the errors of the experimental and theoretical results were in the acceptable range. The results show that DSPI is suitable for detection of internal deep flaws with high accuracy.

**Key words:** information optics; digital speckle pattern interferometry; digital image processing; flaw detection

### 引言

航空航天领域的薄壁结构、现实生活中的一些薄壁容器以及橡胶轮胎等材料所含的缺陷对材料性能会产生较大的影响。常见的缺陷有表面缺陷和内部缺陷, 内部缺陷又可以按照离表面的深度分为近表面缺陷和深层缺陷。缺陷的检测是无损检测领域非常重要的一部分, 目前有很多较成熟的技术用于材料的缺陷检测, 如磁粉检测技术可以检测表面缺陷<sup>[1]</sup>, 超声波检测、射线检测等技术可以检测内部缺陷等等<sup>[2]</sup>。然而这些方法在应用时都或多或少有其局限性, 比如磁粉检测技术、超声波检测技术都需要逐点对物体表面进行扫描, 达不到高速测量的效果; 在利用射线检测技

术时则需要考虑射线对被测物本身属性的影响。

散斑计量作为一门新兴的技术, 不但能克服上述技术的局限性, 并且由于其无接触、高精度和全场测量等优点被广泛应用于检测材料的缺陷尤其是内部缺陷之中<sup>[3-4]</sup>。如对于近表面缺陷, 都可以用散斑干涉技术或散斑剪切干涉技术来检测, 这方面国内外的许多学者作了大量的研究, 获得了许多有价值的成果<sup>[5-6]</sup>。针对孔状的缺陷, 其研究方法是将物体的缺陷区域看成是周边固支的薄板, 在载荷作用下, 被测物体无缺陷区域的变形相对于缺陷区域的变形小, 在散斑条纹图上缺陷区域所对应的干涉条纹的形状、间距和取向不同于周围无缺陷区域的干涉条纹, 通过条纹形状可以获得近表面缺陷的大小, 然后结合薄板理论就可以得到缺陷的近似深度。然而利用散斑计量检测较深层缺陷的研究却比较少。原因是含较深层缺陷的物体在受载时无缺陷区域的变形不能忽略。在散斑条纹图上, 无缺陷区域和缺陷区域产生的条纹将会耦合在一起, 很难通过散斑条纹图直接得到缺陷的大小。另外, 对于

基金项目: 教育部留学人员基金资助项目( M0762)

作者简介: 许星(1987-), 男, 硕士研究生, 现主要从事数字散斑计量与无损检测方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: kfwang@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2011-10-17; 收到修改稿日期: 2011-12-28

含较深层缺陷的物体,其缺陷区域不能再简化成周边固支的薄板。所以此类的缺陷常被视为散斑计量检测范围之外。本文中针对这种情况,从具体的实验模型出发,结合理论分析、数值仿真试图对较深层缺陷的定量检测进行初步的研究。

散斑剪切干涉技术由于其良好的抗震性能,对刚体位移不敏感以及便于工程测量等优点,在缺陷检测方面往往受到人们的青睐<sup>[7-8]</sup>。但是剪切干涉技术也有一定的局限性,在缺陷形状和深度未知的情况下,剪切量、剪切方向和载荷的选取都会直接影响实验是否成功,而散斑干涉技术只需要考虑载荷不同所带来的影响<sup>[9]</sup>。因此,利用散斑干涉技术来检测缺陷的形状和深度也是一种很好的尝试。

基于上述分析,本文中建立了一个深层缺陷薄板模型,考虑整个薄板的离面位移分布,分析出该模型的弹性力学理论解。利用测量离面位移的数字散斑干涉光路检测材料缺陷,结合理论分析得到缺陷的大小和深度,并与数值仿真的结果进行比较。

### 1 深层缺陷模型及其理论分析

本文中选用含有缺陷的试件模型如图 1 所示。

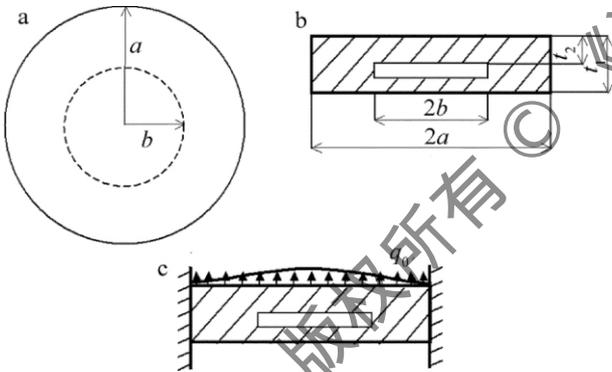


Fig. 1 A circular plate with circular cavity

a—vertical view b—front view c—loading configuration

试件的半径为  $a$ 、厚度为  $t_1$ , 所含的圆形缺陷的半

径为  $b$ , 离表面的深度为  $t_2$ 。上述模型周边固支并在外部真空加载下,受到横向均布载荷的作用见图 1c。为得到离面位移分布公式,将模型分解成一个外圆环薄板和内部圆形薄板。在模型的中心建立极坐标系,由弹性力学薄板理论<sup>[10]</sup>,分别对外薄板和内薄板,离面位移公式表示如下:

$$w_1 = C_1 \ln r + C_2 r^2 \ln r + C_3 r^2 + C_4 + \frac{q_0 r^4}{64 D_1} \quad (1)$$

$$w_2 = C_5 \ln r + C_6 r^2 \ln r + C_7 r^2 + C_8 + \frac{q_0 r^4}{64 D_2} \quad (2)$$

式中  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7$  和  $C_8$  是任意常数,由内外板的边界条件决定;  $q_0$  为均布载荷;  $D_1 = \frac{E t_1^3}{12(1-\mu^2)}$

和  $D_2 = \frac{E t_2^3}{12(1-\mu^2)}$  分别是外板和内板的弯曲刚度,其中  $E$  为弹性模量,  $\mu$  为泊松比。

由于内圆板的中心  $r=0$  处,离面位移必须是一个有限值,这就要求上式中  $C_5$  和  $C_6$  必须都为 0 (2) 式变为:

$$w_2 = C_7 r^2 + C_8 + \frac{q_0 r^4}{64 D_2} \quad (3)$$

此时,只要求出  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_7$  和  $C_8$  就可以获得模型的离面位移。

本文中模型周边固支,在  $r=a$  处边界条件有:

$$(w)_{r=a} = 0, \left(\frac{dw}{dr}\right)_{r=a} = 0 \quad (4)$$

在  $r=b$  处,内外薄板的离面位移  $w$ 、离面位移的导数  $\frac{dw}{dr}$ 、剪力  $Q_r$ 、弯矩  $M_r$  均连续。其中:

$$\begin{cases} Q_r = -D \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \\ M_r = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{\mu}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \end{cases} \quad (5)$$

由以上 6 个边界条件可以列出 6 个方程,从而解出  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_7$  和  $C_8$  如下:

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_7 \\ C_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln a & a^2 \ln a & a^3 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{a} & 2a \ln a + a & 2a & 0 & 0 & 0 \\ \ln b & b^2 \ln b & b^2 & 1 & -b^2 & -1 \\ \frac{1}{b} & 2b \ln b + b & 2b & 0 & -2b & 0 \\ \frac{8(\mu-1)}{b^2} & 8(2 \ln b + 3 + 2\mu \ln b + \mu) & 16(1+\mu) & 0 & -2(1+\mu) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\frac{q a^4}{64 D_1} \\ -\frac{q a^3}{16 D_1} \\ \frac{q b^4}{64 D_2} - \frac{q b^4}{64 D_1} \\ \frac{q b^3}{16 D_2} - \frac{q b^3}{16 D_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

解得:

$$\begin{cases}
 C_1 = -\frac{a^2 b^2 q D_2 (\mu + 1) (b^2 - 7a^2) - a^2 b^4 q D_1 (\mu + 1)}{16 D_1 D_2 (7b^2 \mu - 7a^2 \mu + 9a^2 + 7b^2)} \\
 C_2 = 0 \\
 C_3 = \frac{D_2 q [b^4 (\mu + 1) + a^4 (7\mu - 9)] - D_1 b^4 q (\mu + 1)}{16 D_1 D_2 (14b^2 \mu - 14a^2 \mu + 18a^2 + 14b^2)} \\
 C_4 = \frac{a^4 q D_2 (9a^2 - 7a^2 \mu + 14b^2 \ln a + 14b^2 \mu \ln a) + a^2 b^4 q (D_2 - D_1) (2 \ln a - 1) (\mu + 1)}{32 D_1 D_2 (7b^2 \mu - 7a^2 \mu + 9a^2 + 7b^2)} - \frac{a^4 q}{64 D_1} \\
 C_7 = \frac{b^2 q (b^2 \mu - a^2 \mu + a^2 + b^2) (D_2 - D_1) - 2a^4 q D_2}{4 D_1 D_2 (7b^2 \mu - 7a^2 \mu + 9a^2 + 7b^2)} \\
 C_8 = \frac{b^4 q (D_1 - D_2) [7b^2 \mu - 7a^2 \mu + 9a^2 + 7b^2 - 2a^2 (\ln a - \ln b) (1 + \mu)]}{16 D_1 D_2 (14b^2 \mu - 14a^2 \mu + 18a^2 + 14b^2)} - \\
 \frac{a^4 q D_2 [7b^2 \mu - 7a^2 \mu + 9a^2 + 7b^2 + 14b^2 (1 + \mu) (\ln a - \ln b)]}{16 D_1 D_2 (14b^2 \mu - 14a^2 \mu + 18a^2 + 14b^2)} + \frac{q (b^4 - a^4)}{64 D_1} - \frac{b^4 q}{64 D_2}
 \end{cases} \quad (7)$$

针对具体的物体,将各个参量代入上式可先求得各个系数的值,从而得到内外薄板的离面位移分布。

## 2 深层缺陷实验研究及其误差分析

### 2.1 数字散斑干涉系统及其原理

本文中测量试件离面位移的数字散斑干涉系统如图2所示,一束准直光波入射到分束镜上分成两部分,由于被测物体一般是粗糙表面,具有很好的漫反射效果,所以一部分光照射到被测物体表面并发生漫反射,另一部分入射到由压电陶瓷控制的同样具有漫反射性质的参考平面上并反射回来。物体表面漫反射的物光波和参考平面漫反射的参考光波在 CCD 靶面干涉产生散斑图,并由图像卡采集到计算机中。

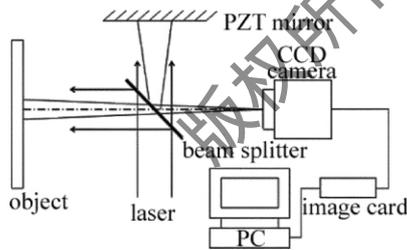


Fig. 2 Digital speckle pattern interferometry system

设物体变形前后 CCD 记录的散斑图强度分布分别为:

$$I_1 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos \varphi \quad (8)$$

$$I_2 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos (\varphi + \delta) \quad (9)$$

式中  $I_o$  和  $I_r$  分别对应于物体光波和参考光波的强度

分布  $\varphi$  为两光波之间的相位差  $\delta$  为由变形引起的相位差,且  $\delta = \frac{4\pi}{\lambda} w$ 。

采用相减模式,得到数字散斑图光强表示如下:

$$\Delta I^2 = 8 I_o I_r \sin^2 \left( \varphi + \frac{\delta}{2} \right) (1 - \cos \delta) \quad (10)$$

采取时间相移算法和相位展开技术能得到  $\delta$  的分布,通过相位展开可得到连续相位分布。根据连续相位分布,离面位移分布表示如下:

$$w = \frac{\lambda}{4\pi} \delta_u \quad (11)$$

式中  $\delta_u$  表示连续相位分布<sup>[11]</sup>。

### 2.2 实验结果及误差分析

所选试件为周边固支的铝质试件,试件的相关参量为:半径  $a = 5\text{cm}$ ,厚度  $t_1 = 4\text{mm}$ ,所含的圆形缺陷的半径  $b = 3\text{cm}$ ,缺陷深度  $t_2 = 2\text{mm}$ ,铝的弹性模量取  $E = 73.7\text{GPa}$ ,泊松比  $\mu = 0.28$ 。采用气压加载方式对试件施加  $3000\text{Pa}$  的压力。图3为实验得到的表示离面位移分布的4幅相移数字散斑干涉条纹图,相移步进量为  $\pi/2$ 。运用4步相移算法及相位扩展技术得到包裹在  $0 \sim 2\pi$  范围内的相位分布,如图4a所示。从图4a可看出,包裹相位图中含有明显的散斑噪声。为了顺利地进行相位展开,需要进行滤波降噪处理。本文中采用同态滤波算法对含散斑噪声的原始包裹相位图进行滤波处理,其中滤波器阶数  $n = 4$ ,截止频率  $D_0 = 5$ <sup>[12]</sup>。

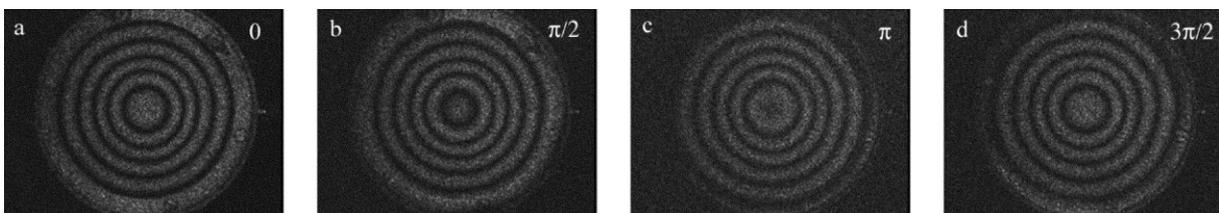


Fig. 3 Phase-shifting fringe patterns with phase shifts of  $\pi/2$

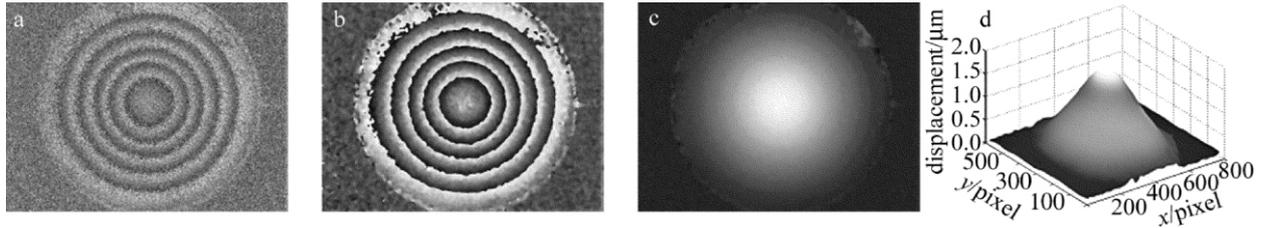


Fig. 4 Results of phase analysis

a—raw wrapped phase map b—filtered wrapped phase map c—unwrapped phase map d—3-D plot of out-of-plane displacement

图 4b 即为滤波后的包裹相位图。利用基于质量图导向的相位解包裹算法<sup>[13]</sup>，得到如图 4c 所示的连续相位分布图。离面位移分布和连续相位分布仅相差一个系数，依据(11)式得到离面位移分布，如图 4d 所示。选取过圆心的一条直径上的离面位移并对其做多项式拟合，如图 5 所示。

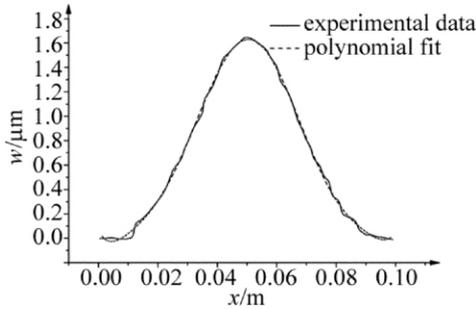


Fig. 5 Experimental curve of the out-of-plane displacement

由实验数据得到离面位移的最大值为 1.64 μm。由图 5 可知，曲线两端即圆板边缘的位置处数据较差，出现了一些奇异点。原因一方面是由于试件通过 6 个螺丝钉固定，不能达到完全的固支，这也是实验数据比理论及有限元模拟的结果大的原因；另一方面由于散斑干涉法对整个实验的环境要求较高，实验平台的稳定性及空气的扰动都会对实验产生影响。

### 3 理论、仿真和实验结果比较

#### 3.1 理论分析结果

将实验中所选用的试件的各个参量代入理论分析的公式中，同样施加 3000Pa 的均布载荷，可以得到外、内薄板的离面位移公式：

$$w_1 = -1.24 \times 10^{-6} - 5.53 \times 10^{-7} \ln r - 4.39 \times 10^{-4} r^2 + 0.11 r^4 \quad (12)$$

$$w_2 = 1.59 \times 10^{-6} - 2.13 \times 10^{-3} r^2 + 0.88 r^4 \quad (13)$$

由公式可知，试件的最大离面位移为 1.59 μm。

#### 3.2 数值仿真结果

利用有限元方法建立相应的模型进行仿真，所得离面位移图见图 6a，同样选取过圆心任一直径，其上的离面位移图见图 6b。从仿真分析得出的结果可知，模型的最大离面位移为 1.549 μm。

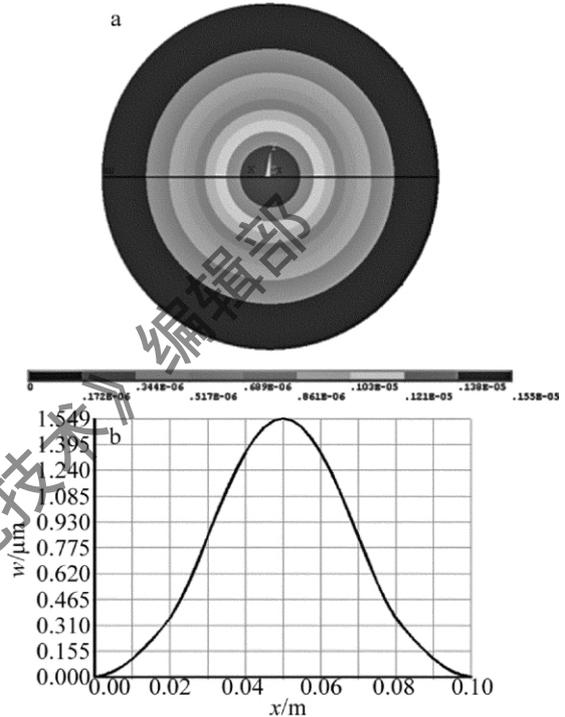


Fig. 6 Numerical simulation results of the out-of-plane displacement

#### 3.3 三者离面位移分布图的对比

图 7 是将 3 种方法得到的离面位移分布图放进一张图中进行对比，可以看出，理论和有限元仿真所得结果能够很好地吻合，实验所得分布图虽有偏差，但也能很好地反映该模型的离面位移情况。以最大离面位移来计算误差，实验和有限元仿真最大离面位移值相对于理论最大离面位移值的误差分别为 2.64% 和 3.14%。

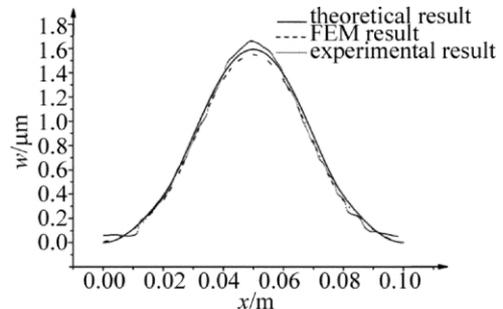


Fig. 7 Contrast of out-of-plane displacement curves

#### 3.4 离面位移 1 阶导数(斜率)分布图的对比

离面位移的 1 阶导数分布图都是由离面位移的分布图数值微分后得到。由于实验中直接得到的离面位

移图曲折且不够平滑,必须经拟合之后才能求其1阶导数。从图8可以看到,有限元模拟和理论所得到的离面位移的1阶导数图比较吻合,两个曲线在20mm和80mm处均有较明显的变化,而实验所得到的曲线在这两位置附近也能看出曲线趋势发生了变化。

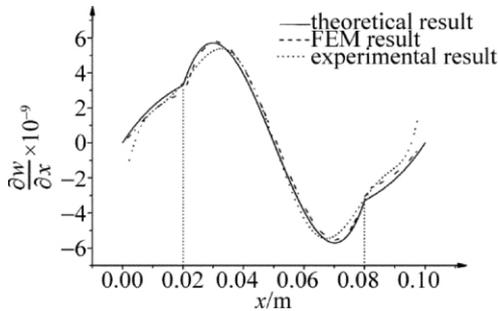


Fig. 8 Contrast of first-order derivative out-of-plane displacement curves

由实验试件可知,在20mm和80mm两处即半径 $r=30\text{mm}$ 处试件的厚度发生了阶跃性的突变,从而导致了离面位移的2阶导数不再连续,即曲率发生突变,这样就使得左右曲线变化的趋势不再相同,这从图8中能验证。

由理论和有限元模拟得到的导数分布图中,可明显看出缺陷的位置,缺陷的半径也能很精确地计算出

$$b = \frac{80\text{mm} - 20\text{mm}}{2} = 3\text{cm}.$$

依据实验中所得到的1阶导数分布图,获得的缺陷就有所偏差,根据对称性并依据右半边缺陷位置可估算出半径 $b \approx (83\text{mm} - 17\text{mm}) / 2 = 3.3\text{cm}$ ,误差为10%。

#### 4 缺陷的定量分析

由以上分析,从实验得到的1阶导数的分布图中可以获得缺陷的大致半径 $b=3.3\text{cm}$ 。得到半径之后,依据理论分析可计算出缺陷的深度 $t_2$ 。将 $D_2$ 代入

$$(3) \text{ 式可得: } w_2 = C_7 r^2 + C_8 + \frac{3(1-\mu^2)q_0 r^4}{16Et_2^3} \quad (14)$$

将 $r=b$ 处的离面位移值 $w_2|_{r=b} = 0.21\text{mm}$ 代入上式,得到深度 $t_2$ :

$$t_2 = \sqrt[3]{\frac{3(1-\mu^2)q_0 b^4}{16E(w_2|_{r=b} - C_7 b^2 - C_8)}} = 2.056\text{mm} \quad (15)$$

深度的误差为2.8%,这样,缺陷的两个重要参量大小和深度都可以得到。

#### 5 结论

通过建立含较深层缺陷的物体模型,从理论上得到模型在均布载荷下的离面位移分布函数。并用有限元分析证明理论分析的正确性。此外,利用离面位移数字散斑干涉系统对实际含较深缺陷试件进行测量,

测得试件的离面位移分布,进一步利用数值拟合和数值微分得到离面位移的1阶导数分布。从离面位移的1阶导数分布图上测得缺陷的半径,在此基础上结合由理论得到的离面位移分布函数,可以实现对缺陷深度的检测。具体结论如下:

(1) 数字散斑干涉技术、数值仿真得到的离面位移与理论结果一致,证明了深层缺陷理论分析的正确性。

(2) 利用数字散斑干涉技术准确获得缺陷的大小和深度信息,表明数字散斑干涉技术测量物体内部深层缺陷具有可行性。

(3) 提出的方法为进一步研究材料内部较深层缺陷提供了良好的理论与实验基础。当然也有不足之处,比如缺陷位置不在试件中间以及缺陷未必是圆形等,所以如何检测位置、形状及深度未知的内部深层缺陷将是作者下一步要研究的内容。

#### 参考文献

- [1] STANLEY R. Magnetic field measurement: the Gaussian meter in magnetic particle testing [J]. *Materials Valuation*, 1983, 46(12): 1509-1512.
- [2] ISAACSON B G, KROHN B. Digital radiography pinpoints casting defects automatically [J]. *Materials Evaluation*, 1987, 45(8): 884-885.
- [3] CHAN F W Y. A novel optical method without phase unwrapping for subsurface flaw detection [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(1): 186-193.
- [4] AMENABAR I, MENDIKUTE A, LOPEZ-ARRAIZA A, et al. Comparison and analysis of non-destructive testing techniques suitable for delamination inspection in wind turbine blades [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2011, 42(5): 1298-1305.
- [5] SHANG H M, CHAU F S, TAY C J, et al. Estimating the depth and width of arbitrarily-oriented disbonds in laminates using shearography [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 1990, 9(1): 19-26.
- [6] LI X D, LIU X F, WANG K. Quantitative detection of the defects in thin-walled pressure vessels with holography and shearing speckle interferometry [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2002, 21(3): 85-94.
- [7] HUNG Y Y. Shearography for non-destructive evaluation of composite structures [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1996, 24(2/3): 161-182.
- [8] HUNG Y Y, HO H P. Shearography: an optical measurement technique and applications [J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports* 2005, 49(3): 61-87.
- [9] KYUNG S K, KANG K S, KANG Y J, et al. Analysis of an internal crack of pressure pipeline using ESPI and shearography [J]. *Optics & Laser Technology* 2003, 35(8): 639-643.
- [10] XU Z L. *Elastic mechanics* [M]. Beijing: High Education Press, 2006: 23-26 (in Chinese).
- [11] WANG K F, GAO M H. *Speckle metrology* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010: 97-99 (in Chinese).
- [12] GU G Q, WANG K F, YAN X J. Electronic speckle interferometry image processing based on homomorphic filtering [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(6): 750-752 (in Chinese).
- [13] GHIGLIA D, PPRIT M. *Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms and software* [M]. New York, USA: Wiley, 1998: 157-194.