

用电子散斑法对纯镍薄片弯曲变形的测量¹⁾

郭香华 方岱宁 李喜德

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘要 由于建立的电子散斑法有位移测量精度高、量程大的特点, 且自制的力传感器灵敏度高、量程相对较大, 从而保证了本实验中镍片在三点弯中的反应被全程、精确地记录下来. 基于时间序列的电子散斑法, 测出了 10~100 μm 不同厚度的纯镍薄片在三点弯下的载荷-位移曲线, 其中包括弹性部分以及进入塑性屈服两个阶段, 据此可以推出不同厚度镍片的三点弯刚度. 实验表明镍片的抗弯刚度受其厚度的影响很大, 尤其在薄片厚度较小时表现得更为明显, 即表现出明显的尺度效应.

关键词 应变梯度, 抗弯刚度, 电子散斑法, 脉冲计数

1 引言

微米和亚微米结构常表现出与块体材料不一样的电学、光学和机械特性, 同时小尺度结构具有功耗小、灵敏度高等特点. 随着制造工艺的改进, 微机电系统 (MEMS) 在各个领域内得到了广泛的应用^[1]. 例如微马达、微光路开关、汽车安全气囊的加速度计以及微齿轮、用于药物传送的微流控制装置、DNA 芯片和化学传感器中的探测阵列等^[2,3]. 在目前的应用领域内, 大多数微器件的尺寸都在微米尺度. 由镍制成的微型结构使用于微光路开关, 加速度计等微小机构中, 其尺度从几个微米到上百个微米等. 在这些机构中, 金属薄片产生弹性变形施加载荷, 但其变形和抗力的关系是否和我们所熟知的块体材料的本构关系一致呢? 这有待于实验验证. 鉴于微小尺度结构在很多领域的广泛应用, 人们对其物理和力学性质的研究越来越迫切. Fleck 等^[4]的细铜丝扭转实验以及 Stolken 等^[5]和 Shrotriya 等^[6]的纯镍薄片弯曲实验揭示了金属塑性梯度的存在. 前者的实验显示细铜丝抗扭刚度随直径的减小而增大, 而后者的实验也有类似的结论: 纯镍薄片的抗弯刚度随厚度的减小而增大. 可以说这些实验都比较成功, 然而, 在有些实验中试件本身的变形很复杂, 不利于力学分析, 有些在测量时要与试件接触, 这也影响了实验精度. 针对要做实验的情况, 笔者采用了光学方法来测量试件变形. 现代电子技术的发展使得光学测量方法应用范围大大扩展, 除了测量精度得到提高外, 其可测量范围也扩大了, 使得光学测量成了真正的高精度、大量程和非接触的测

量方法^[7].

2 实验原理

当被测物体发生变形前后, 表面各点的散斑场振幅 $u_0(x, y)$ 基本不变, 而相位 $\phi_0(x, y, t)$ 将改变为 $\Delta\phi(x, y, t)$. 变形前后参考光波维持不变, 因此物体发生变形后的散斑光强分布为

$$I(x, y, t) = I_0(x, y) + I_m \cos \phi(x, y, t) \quad (1)$$

在数字化散斑干涉计量中, 由于采用了视频记录与数字化存贮, 因而可以将变形前后两个时刻的散斑场分离, 通常采用减模式来表征变形信息. 从式 (1) 可以看出, 如果用 CCD 以恒定速度拍下一系列散斑图, 在空间某一点的灰度是随时间变化的余弦曲线. 通过一系列计算, 可得出该点在时刻 t_i 和时刻 t_j 之间的相位变化

$$\Delta\phi(x, y, t_{ij}) = \phi(x, y, t_i) - \phi(x, y, t_j) = m\pi + \Delta m\pi \quad (2)$$

其中 $m\pi$ 为半周期的整数倍, $\Delta m\pi$ 为半周期的小数倍, 表示该点的灰度波形变化曲线中, 减去所有完整的半周期波形之后所剩波形代表的相位变化, 因此, $\Delta m\pi$ 为正. 在实际实验中, 如果试件变形较大, 则半周期数 m 较大, 而 Δm 最大不超过 2, 可以忽略 $\Delta m\pi$ 项, 从而大大提高计算速度, 精度损失又很小. 本文的实验由于数据处理量很大, 因此忽略了式 (2) 的第 2 项. 由光波传播理论及式 (2) 可得

2004-03-11 收到第 1 稿, 2004-11-10 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金项目 (10025209, 90208002, 10232030) 和教育部重点项目资助 (0306).

试件的离面位移

$$W(x, y, t_{ij}) = \frac{\Delta\phi(x, y, t_{ij}) \cdot \lambda}{4} \quad (3)$$

其中 λ 是激光波长. 由式 (3) 可知, 光波相位变化与物体离面位移成正比. 如果连续拍摄散斑图, 那么从任意一点的灰度变化可得出此点的相位变化, 也即推算出该点的位移值.

3 实验装置及测量系统

实验装置见图 1, 主要包括位移测量系统和微力测量系统. 实验中, 由 He-Ne 激光器发出的激光分成两束, 一束照在试件上并经薄膜表面散射后通过半透半反镜, 与参考光在 CCD 靶面叠加产生干涉. CCD 以 12 帧/s 的速度拍摄干涉图并输入计算机. 本实验采用三点弯加载, 在跨距为 15 mm 的两支撑点中间为加载点. 在加载过程中从监视器里能直接看到试件和加载头的图像, 用相关的图像软件就可保证加载头的位置精确到 1 个像素的精度. 加载头与分辨率达 0.1 mN 的力传感器相连. 传感器采集的信号经放大器放大之后输入计算机, 由 AD 卡处理便可得到载荷值. 在这个装置中, 载荷和像是同步得到并保存于计算机中, 经过预先编制的程序处理, 就可得到载荷 - 位移图.

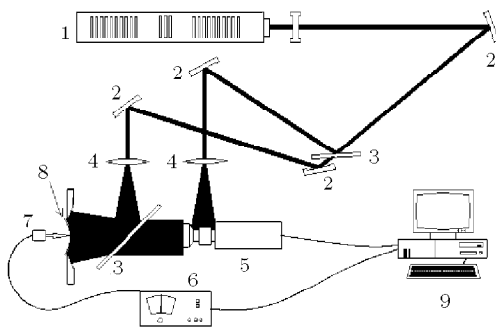


图 1 实验装置简图

- 1 激光器, 2 反射镜, 3 半透半反镜, 4 扩束镜, 5 CCD
6 放大器, 7 传感器, 8 试件, 9 计算机

在这个实验中, 散斑图和载荷的采集速度是可以控制的. 由于散斑法灵敏度较高, 加载头的推进速度不能太快. 为了适应采集系统对干涉图像的时间和空间分辨, 试件的变形必须是缓慢变化的, 且由其引起的干涉场相位变化必须满足图像采集系统的时间采样频率条件. 所以在本文中设计的微加载装置采用位移加载模式, 而且使用了多级减速机构. 用来减速的皮带很软, 除了传输动力外, 还有隔振效果. 图像和载荷的采集速度和加载头的前进速度

要适当, 才能既保证精度又有足够硬盘空间保存图像. 本实验加载头的前进速度控制在 $0.2\mu\text{m/s}$ 左右比较合适.

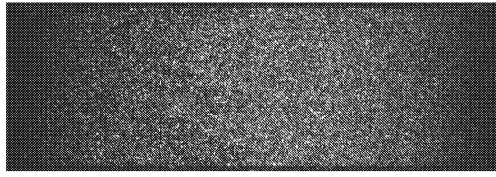
由于这个实验的数据量很大, 因此有必要用程序来实现数据的自动可控采集. 在这个实验中, 我们用 C++ 编制了适合于本实验的自动采集程序, 其使用界面如图 2. 除了实现图像和载荷的自动读入和保存外, 还可在保存图像的同时实现图像的相减以显示条纹, 这样可实时显示试件变形是否对称. 为了节省空间, 本程序可控制采集图像的位置和大小, 甚至在需要的时候采集窗口内的任意像素. 另外, 本程序可控制 AD 卡采集通道的转换, 方便有多个采集点时的使用.



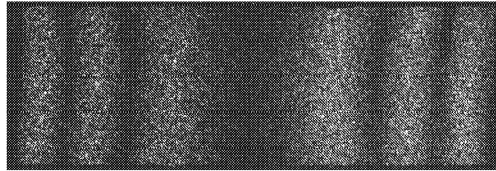
图 2 本实验所用的采集系统的主窗口

4 实验结果及讨论

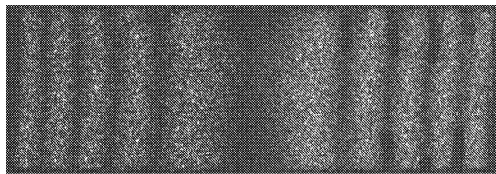
本实验的试件纯度为 99.99% 以上的镍薄片. 薄片经过 760°C 真空退火处理 6 h, 以消除残余应力, 同时使得薄片内部晶体结构均匀. 实验试件长 30 mm, 宽 5 mm, 厚度从 $10\mu\text{m}$ 到 $100\mu\text{m}$ 不等, 共 10 种厚度的试件. 在三点加载中跨距为 15 mm. 每一种厚度的薄片都有 3 个试件进行了实验, 实验中对每一个试件的变形都进行了完整的记录, 大约有 3 到 4 万幅图以及相应数量的载荷值被采集下来保存到硬盘里. 因此, 整个过程需要大量的存储空间. 由这些保存下来的图片和文件就可重建试件的变形过程. 图 3 显示了一个厚度为 $20\mu\text{m}$ 的试件条纹变化过程, 从图中可看出, 试件的变化基本上是对称的, 随着条纹的增多, 条纹越来越密, 而且条纹从中间出现, 并向两边堆积变密. 这些条纹显示了试件发生的离面位移, 两边堆积变密说明了支撑固定不动, 试件几乎没有滑移. 条纹再增加就变得模糊不清了, 这也是这个实验不能直接用条纹方式来测定位移的原因.



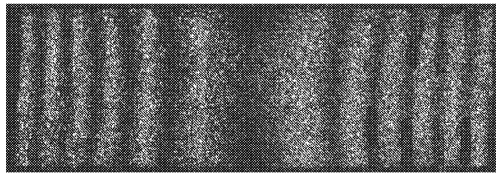
(a) 第 5 幅减第 1 幅



(b) 第 15 幅减第 1 幅



(c) 第 30 幅减第 1 幅

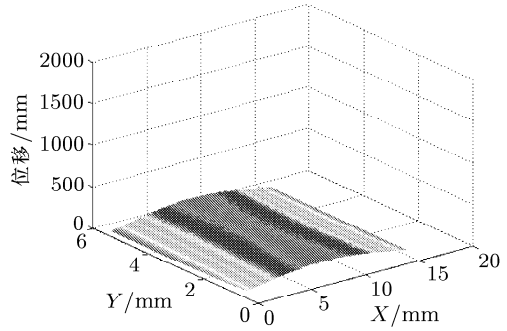


(d) 第 60 幅减第 1 幅

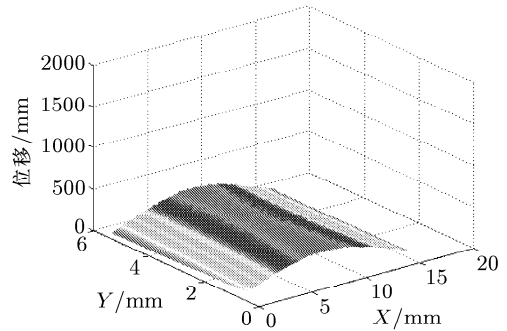
图 3 实验中拍摄到的散斑图相减得到的条纹图

因为人们肉眼分辨条纹图的能力有限，因此条纹图所能测量的变形范围有限，即使用累加的办法可以扩大测量范围，但难于保证精度，而且对于相位角只能估算了。时间序列散斑干涉法可以避免以上缺点，使散斑法的测量范围扩大了，甚至能到毫米级，且可精确地计算各点相位。图 4 就是基于时间序列散斑干涉法计算出几个时刻试件的全场变形。

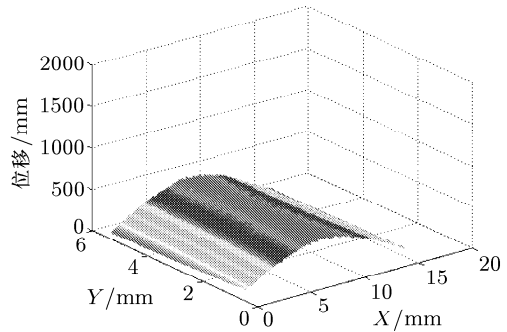
从条纹图和全场变形图可看出，试件的变形基本上是左右对称、上下对称的。因此，试件的中间水平



(b) 第 4000 帧



(c) 第 8000 帧

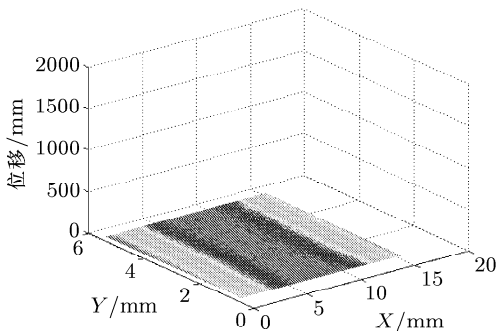


(d) 第 12000 帧

图 4 某个时刻试件的全场变形

线的弯曲变形基本上可代表整个试件的变形。由图可见，开始试件变形很小，并且试件的轮廓是光滑曲线，在变形增大之后，明显在试件的中间有一段曲率较大，而两边较小。这表明在试件中间出现了塑性变形，产生了类似于杆件在承载中出现的塑性铰的屈服部位。

上文已经详细地介绍了实验的原理、装置以及如何把试件的变形用一系列的散斑图再现出来。接下来要做的事就是重复这个过程，把不同厚度的试件在三点弯下的变形和抗力记录下来。其中每一种厚度的试件都做了 3 个，所得的载荷 - 位移图如图 5 所示。由图中可看出，载荷 - 位移曲线的弹性阶段和塑性阶段的分界很明显，在弹性阶段基本上是线



(a) 第 100 帧

性,而且3个试件的载荷-位移曲线基本上是重合的,这也说明了这个实验的可重复性很好。

为了考察试件的厚度对试件的弹性或塑性性质有何影响,笔者用最简单的薄板模型来模拟这些试件变形。虽然经典的板理论在“Kirchhoff 假定”,也即板的挠度较小时才适用,但当板弯曲成“可展开曲面”(例如锥面和圆柱面)时,薄板在较大变形时“Kirchhoff 假定”仍然成立。薄板的基本挠度方程为

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p}{D} \quad (4)$$

其中 w 为薄板挠度, p 是横向作用力,板的弯曲刚度 D 与杨氏模量 E 和泊松比 ν 的关系为

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (5)$$

考虑到实验的相关数据:薄片长 $L = 15 \text{ mm}$, 宽 $b = 5 \text{ mm}$ 以及在跨中加载,可以得到抗弯刚度^[8]

$$D' = \frac{E}{12(1-\nu^2)} = \frac{F}{w} \times \frac{15.08}{h^3} \quad (6)$$

从经典弹性理论可知,梁或者板的抗弯刚度是代表了材料本身的性质,而与其厚度无关。那么从式(6)看来,试件的载荷-位移曲线在弹性阶段的斜率应该是和试件厚度的3次方成正比,否则就不能保证抗弯刚度是一个常量。由图5中各条载荷-位移曲线算出在弹性变形阶段的斜率,就可进一步算出各个试件的抗弯刚度,如图6所示。计算结果表明试件的抗弯刚度不是常量,而是随着试件厚度的减小明显增大,即其弹性抗弯刚度与试件的尺寸明显相关。

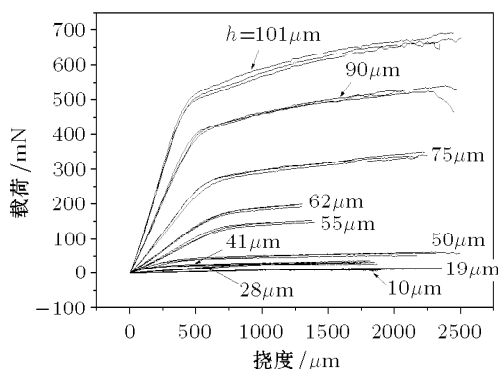


图5 各种厚度的纯镍薄片在3点弯中的载荷-位移曲线

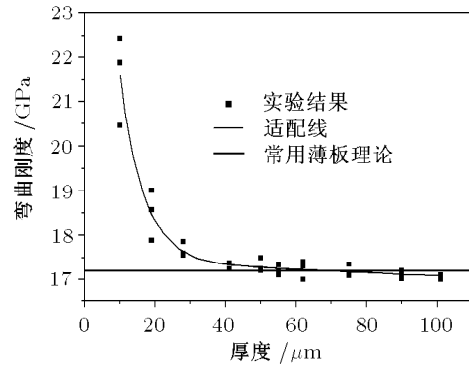


图6 用经典板理论求得各个试件的抗弯刚度

5 结论

实验表明纯镍薄片的抗弯刚度受其厚度的影响很大,在薄片厚度较小的时候这种影响表现得尤其明显。在微尺度下,材料的性质往往表现出与其尺寸相关,即表现出尺度效应。因此,传统的变形理论不一定能在微尺度使用,必须做某些修改。本文的实验结果表明某些金属材料的力学行为不仅在塑性变形时与尺度相关,其弹性行为也与尺度相关。

参 考 文 献

- 1 Liu CC, Jin ZH. Applications of microfabrication and micromachining techniques to biotechnology. *Trends in Biotechnology*, 1997, 15: 213~216
- 2 Datta M, Landolt D. Fundamental aspects and applications of electrochemical microfabrication. *Electrochimica Acta*, 2000, 45: 2535~2558
- 3 Suzuki H. Microfabrication of chemical sensors and biosensors for environmental monitoring. *Material Science and Engineering*, 2000, 12: 55~61
- 4 Fleck NA, Muller GM, Ashby MF, et al. Strain gradient plasticity: theory and experiments. *Acta Metall Mater*, 1994, 42: 475~487
- 5 Stolken JS, Evans AG. A microbend test method for measuring the plasticity length scale. *Acta Materials*, 1998, 46(14): 5109~5155
- 6 Shrotriya P, Allameh S M, Lou J, et al. On the measurement of the plasticity length scale parameter in LIGA nickel foils. *Mech Mater*, 2003, 35: 233~243
- 7 Li X, Soh AK, Deng B, et al. High-precision large deflection measurements of thin films using time sequence speckle pattern interferometry. *Meas Sci Technol*, 2002, 13: 1304~1310
- 8 Ugural AC. *Stresses in Plates and Shells*. 2nd Ed. McGraw-Hill Companies, 1999. 149~154

MEASUREMENT OF DEFORMATION OF PURE Ni FOILS USING TIME SEQUENCE SPECKLE PATTERN INTERFEROMETRY

GUO Xianghua FANG Daining LI Xide

(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract By employing the sequence pulse counting method (SPCM) and a high sensitive micro load-sensor, a precise and sensitive measurement system was established to measure the load-deflection curves of pure Ni foils (purity 99.99%) under three-point micro bending. The whole deformation field and the applied force were recorded precisely and completely. On the basis of the measured curves of the pure Ni foil beams with various thickness ($10 \sim 100 \mu\text{m}$), it is found that the elastic bending rigidity is strongly dependent upon the thickness of the micro beams, that is, an obvious size effect is demonstrated.

Key words stain gradient, flexural rigidity, time sequence speckle pattern interferometry, pulse counting