

## 激光全息无损检验

光学全息组

(天津大学精密仪器系)

### 一、引言

在宇宙航行等现代尖端技术中,采用新工艺胶接技术来代替旧的铆接,不但可以使构件的表面光滑,减少飞行中空气的阻力,而且也减轻构件的重量,从而提高其强度重量比。为了使这种新工艺制成的构件工作可靠,必须判断其质量,无损检验技术是十分必要的。

无损检验方法有许多种,如超声、辐射、磁力、微波、红外和液晶等<sup>[1]</sup>,但这些方法在检验中都不能给出明确的量的概念;而不定量的检查,生产的合格率就缺乏标准。在这方面,激光全息无损检验技术是一个进展,它可以提供比较正确的数据,进行必要的定量分析。

激光全息无损检验是全息干涉分析的一种应用,它可以用来监视一个复杂的物体在两个不同时刻里所发生的变形,不管物体表面是光洁或粗糙,都可以观测到光学公差水平(几分之一微米以下)。由于它是利用全息技术再现原理,因此是无接触地进行三维立体观测,和经典的干涉仪比较起来,全息干涉分析仪具有加工精度低、装调较为方便的特点。全息干涉分析在无损检验中已解决了一些用其他手段难以解决的问题。

用全息技术来分析宇航中大量使用的蜂窝结构件

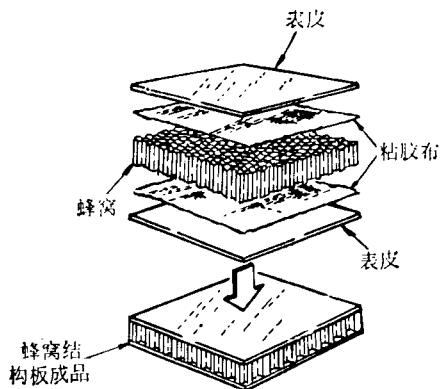


图1 蜂窝结构示意图

(如图1所示)的质量时,效果是良好的。在我们的试验中,有一处是5毫米直径大小的人工脱胶伤,试验结果表明缺陷可以清楚地观察到。全息技术检验蜂窝结构的灵敏度和超声穿透技术差不多<sup>[2]</sup>,但全息分析具有成本低、速度快的优点,这对于大型构件更甚优越,同时全息技术也较易掌握。当采用天津感光胶片厂生产的“I型全息干版”作记录介质时,用8分钟左右的时间可以完成一次检验。

除超声外,目前几种检验胶结件的方法,如声阻法、胶结强度检查仪、X光照相和液晶等,在检验缺陷的种类和准确性方面都还不如全息优越。例如:声阻法只能检查表皮小于1毫米的胶接件,不能查出贴合伤(有胶层,但没有粘结力),检查时是点接触,表面容易划伤。胶结强度检查仪需要偶合剂,对于弧形曲面检查也不方便。X光照相对于蜂窝格子压塌的检查较为有效,但对于脱胶伤则查不出。液晶法通常只能检查表皮厚度为0.3毫米左右,表皮厚度再增加也就难以检查。因此,全息无损检验一出现就很受欢迎。

### 二、激光全息无损检验基本原理

应用全息照相原理来进行无损检验通常有三种方法,即实时法、两次曝光法和时间平均法。一般以实时法进行检验较为优越,它只要用一张全息照片便可以重复地改变物体的变形条件,以较快地达到某种分析的目的。实时法的基本过程如下。

首先对被检验的物体记录下一张全息照片,这张照片经处理后精确地放回在原记录时的位置上(以下简称复位),并用原记录时所用的参考光来照明这张全息片。同时,被检验的物体也应保持原记录时的位置和状态,并被原物光所照明。这时,我们透过全息照片看原物体时,就可以观察到一个干涉场。这个干涉场由两个光波组成:一个是全息照片被原参考光照射后所衍射出来原物体的全息像;另一个是物体本身散射出来的光波。由于全息照片是精确复位的,因此物体本身散射的光波与全息片所衍射的光波产生干涉。如

果复位是理想的,并计及到再现时发生  $\pi$  周相的变化,这时光场为相消干涉,当两波前振幅相等时,达到消光,出现暗视场。但一般由于振幅不等而出现一个亮场。

当给被检验物体施加一个微应力时(这种力不会损害物体的质量,所以是无损),如热应力等,这时物体将产生弹性变形,原物体的光波与全息片所衍射的全息像的光波将彼此错开一个间隔  $\delta$ ,如图 2a 所示,在新的空间位置里产生干涉。这时所观察到的干涉场是一些亮暗相间的干涉条纹。

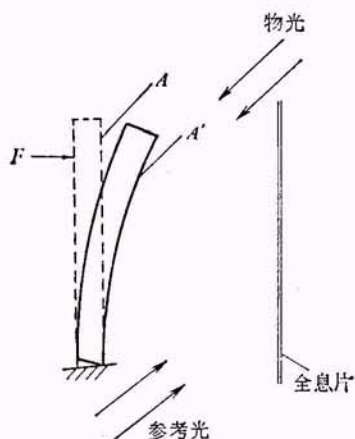
当间隔  $\delta = K\lambda$  时,出现亮条纹。

$\delta = (K + \frac{1}{2})\lambda$  时,出现暗条纹。

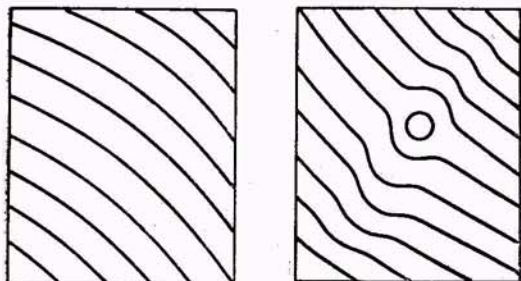
这里  $\lambda$  为激光光波波长。

$K = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  为干涉条纹级数。

伟大领袖毛主席教导我们:“外因通过内因而起作用”<sup>[1]</sup>。物体在外力作用下,各处变形量的大小与各部份的构造有关。内部有缺陷的地方与内部没有缺陷的地方,反应到外表面的变形量也不同,因而各处所对应的干涉条纹的形状和间隔也不相同。构件内部不含缺陷时,所观察到的干涉条纹的形状和间隔是宏观的,



(a) 用实时法进行全息无损检验基本原理示意图(A 为构件的全息像, A' 为构件受力变形后的位置)



(b) 无缺陷时的干涉条纹 (c) 有内部缺陷时的干涉条纹  
图 2

连续的,如图 2b 所示。如果内部含有缺陷,由于变形量的不同,结果该处就以干涉条纹的异状出现,在缺陷区域出现干涉条纹不连续的突变。如图 2c 所示。根据条纹数可以算出变形量的大小,这就是激光全息无损检验的粗浅道理。

### 三、进行激光全息无损检验的试验方法

根据激光全息无损检验的基本原理,在有关单位协助下,我们设计和制造了用以进行无损检验的全息干涉分析仪(如图 3 所示)。它主要由以下四部份组成:

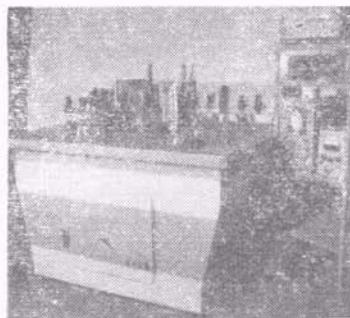


图 3 用于无损检验的激光全息干涉分析仪

1. 可移动的防振工作台,下部装有四个直升飞机轮胎作为减振气垫。
2. 光学仪器部份,用磁座固定在台面上(如图 4 所示),扩束镜(7)和针孔滤波器做成一体,相互可作微调,缩放透镜(12)用来调节照明物体光束直径的大小,同时可以作轴向微调,与反射镜(6)配合,用以控制干涉条纹的间距<sup>[4]</sup>。
3. 构件夹(图 4 未表示)和加载系统。
4. 激光器(北京科学仪器厂生产的 T<sub>1</sub> 型 He-Ne 激光器)。

由于乳剂的收缩以及操作过程中系统的不稳定,在实时法检验中通常都要出现一、二条初始的干涉条纹,这一问题使某些定量分析复杂化,而对于只要求定性分析或不很严格的量的要求来说,这种初始条纹则可以忽略不计。实时法中再现波前的光强往往较物体波前弱,干涉结果对比度差,这虽然可以通过光能调节器(10)弥补,但要得到最好反差的干涉条纹则需采用两次曝光法。

常用时间平均法分析振形,在全息无损检验中激振则作为使物体变形的一种手段,实时-时间平均法则需借助闪频法进行观察。

在全息无损检验中,对于不同物体,选择正确的加

1) 毛泽东,《矛盾论》,《毛泽东著作选读》甲种本,人民出版社, (1966), 59.

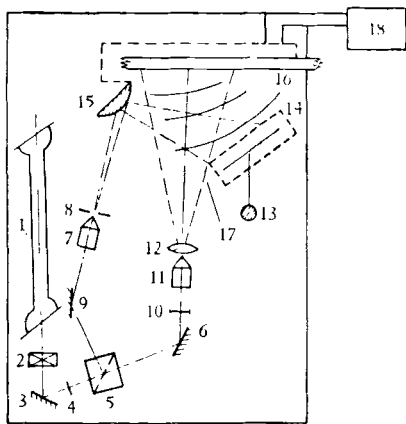


图4 激光全息干涉分析仪组成

1—He-Ne 激光器； 2—光闸； 3, 6, 9—平面反射镜； 4—可变光栏； 5—可调分光镜； 7—10 倍扩束镜； 8—滤波器； 10—光能调节器； 11—40 倍扩束镜； 12—缩放透镜； 13—实时片夹； 14—就地处理架； 15—球面反射镜； 16—试验构件； 17—挡板； 18—加载系统（电热板、真空泵或音频信号发生器）

载方法使它产生恰如其份的变形是一个关键的问题，从而使缺陷以异常状态的干涉条纹出现。我们采用过如下几种加载方法：

### 1. 热应力

采用热应力使构件产生变形是一种简单而又有效的加载方法，它在生产实际中尤为适用。一般用电热盘、吹风机、红外灯等在构件的前面或后面加热，只要使构件表面发生 2 微米左右的位移，就可以使构件的内部缺陷反应出来。当温度升高 10℃ 左右时，干涉条纹就很密集，采用条纹控制办法可以节省冷却过程所需的时间。

### 2. 真空压力

改变气压使构件变形是另一种加载手段，这种方法对于检查金属与非金属胶结面的质量时特别灵敏。在我们试验中采用玻璃钢钟罩作真空室，对一种铍青铜与橡胶的粘结零件进行试验，真空减压后在构件上所产生的干涉条纹主要由两方面组成。一种是当气压由  $P_1$  改变为  $P_2$  时，构件变形相应出现一组干涉条纹。这时构件表面承受改变的气压  $\Delta P$  为

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \Delta h/S. \quad (1)$$

式中  $\Delta h$  为用水柱压力计测定的气压值。S 为水银的比重。

与此同时，由于气压的变化在气室内将引起折射率的变化，因而使光波偏折的方向相应发生改变，从而出现另一组干涉条纹。设两波前分开的间隔为  $\delta$ ，即：

$$\delta = \lambda/2|n_2 - n_1|. \quad (2)$$

这里  $\lambda$  为照明激光的波长， $n_2$  和  $n_1$  为两种不同气压下的折射率，这组干涉条纹指出了构件外形轮廓的等高线。但实际上影响不大。

此外，真空室本身的变形也将对构件引起附加的干涉条纹，但玻璃钢钟罩相对于橡胶和铜皮的粘结试件来说，刚度要好得多，变形量可以忽略。

### 3. 振动力

对构件激振使它产生共振，底片在物体振动时进行曝光，根据时间平均法理论<sup>[1]</sup>，作简谐振动的物体，其时间平均全息像仪上的亮度分布  $I(x, y)$  可以用零阶第一类贝塞尔 (Bessel) 函数来表示，即

$$I(x, y) \propto a(x, y)a^*(x, y) \times \left\{ J_0 \left[ \frac{2\pi}{\lambda} D(x, y)(\sin \alpha + \sin \beta) \right] \right\}^2. \quad (3)$$

这里  $a(x, y)$  为静止物体在点  $(x, y)$  处的复数振幅， $\lambda$  为所用光波波长， $D(x, y)$  为物体表面上点  $(x, y)$  处的振动振幅， $\alpha$  为摄制全息片时照明物体光束与振动方向之间的夹角， $\beta$  为观察方向与振动方向之间的夹角。

方程 (3) 说明在观察振动表面的干涉条纹时，暗条纹相应于  $J_0$  函数的零值，亮条纹相当于函数的极大值，但是这些极值将随着振幅  $D(x, y)$  的增加而减少，如图 14、15 所示。

将这种振动力用于无损检验时，所施加的激振强度通常是使构件整体基本保持不动，而只有构件的缺陷区域作微小的振动，为此，一般需要用强功率的高频来激励，非金属材料可在 10 千赫以下，而金属材料则在 10 千赫以上。

使用振动力的一个特点是它不但可以提供缺陷的大小，而且还可以求出缺陷的深度<sup>[2]</sup>。当一个缺陷区域被振动力所策动时，在达到共振频率时观察缺陷区域的异常条纹。按照鼓的振动方程，

$$\text{基频 } f = 10^3 D/r^2. \quad (4)$$

这里  $D$  是鼓的厚度， $r$  是鼓的半径。

根据当时观察到的异常条纹区域的大小，可以确定鼓的半径。由上式可以进一步算出缺陷距表面的深度  $D$ 。对于蜂窝结构件和纯胶接件这类元件来说，确定了鼓的半径以后一般便可实现定量分析。

### 4. 静载荷

在构件的不同位置施加一定的载荷，或把构件底部固定，在顶部施加一力矩使构件产生扭转变形。

因为两个波前的干涉经常不是在物体的表面而是在空间不同的位置，因此，将全息照片再现后照成普通照片时应注意把相机的光圈适当缩小，以加大景深，使所摄得的干涉条纹较为清晰。



## 四、激光全息无损检验结果实例分析

### 1. 对蜂窝结构件的试验

图5—7为同一块蜂窝结构件的试验结果,表皮厚1.2毫米,采用热应力,两次曝光法。(图5)右边的同心干涉条纹中间似乎看不出有缺陷,采用二种不同的干涉条纹调制方法,结果干涉条纹形状虽然不同,但缺陷都在同一地方表现出来,如图6、图7所示。

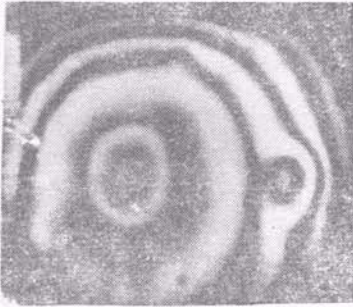


图5 蜂窝结构件采用热应力,二次曝光法(一)

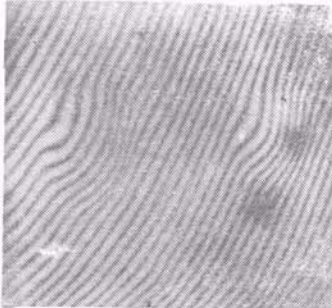


图6 蜂窝结构件采用热应力,二次曝光法(二)

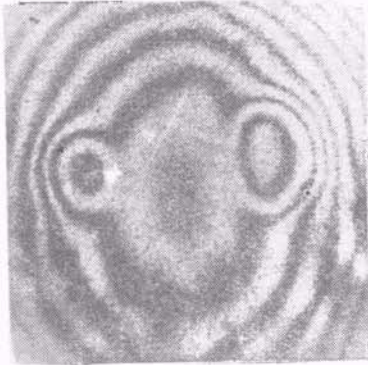


图7 蜂窝结构件采用热应力,二次曝光法(三)

图8为一块表皮厚度0.3毫米的蜂窝结构件,热应力加载,实时法观察,可以看到每一蜂窝格子与表皮的粘结情况以干涉图样反应到表面上来,表皮在窝格与窝心之间的变形量相差0.3微米左右,右下角显然有缺陷。

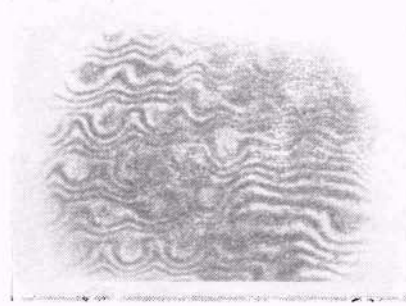


图8 蜂窝结构件采用热应力,实时法

### 2. 轿车轮胎的试验

图9说明:在胎侧有三个针孔大小的缺陷,在22磅/吋<sup>2</sup>气压曝光一次,减压 $\Delta P$ 后再曝光一次,结果出现三个明显的干涉圈。



图9 轿车轮胎二次曝光

### 3. 金属与橡胶粘结件的试验:

利用真空减压对铍青铜与橡胶的粘结质量进行检查,当粘结质量好时,整个表面出现有规律的干涉条纹(图10)。图11上的“千疮百孔”说明粘结质量低劣,有许多脱粘的地方。图12为采用振动力对这类构件的试验结果。图13采用热应力对这类构件的试验结果。与图10的结果相同,粘结质量好。

### 4. 对音叉振型的观察

图14、15是用时间平均法所记录的音叉振型。

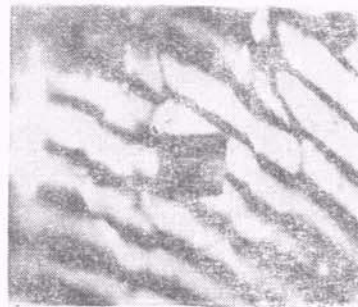


图10 橡皮与金属粘结件真空减压实时法(一)



图 11 橡皮与金属粘结件真空减压实时法(二)



图 12 橡皮与金属粘结件激振法  
频率 = 6530HZ

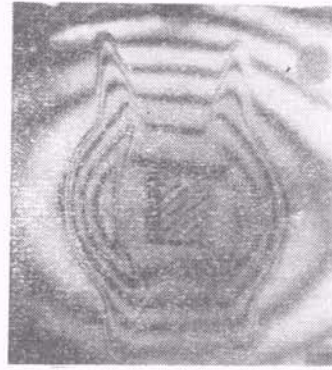


图 13 橡皮与金属粘结件  
热应力二次曝光

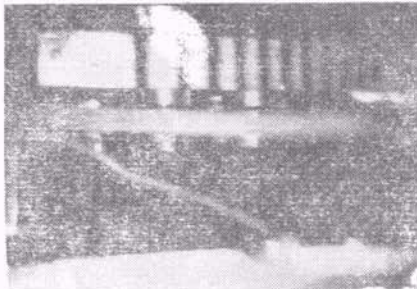


图 14 音叉频率 = 505HZ, 输出电压 = 0.8 伏

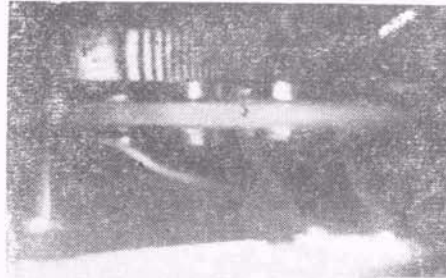


图 15 音叉频率 = 505HZ, 输出电压 = 8 伏

## 五、结 语

实践表明, 激光全息干涉分析在无损检验方面有着多方面的应用价值, 对于可以采用全息技术来进行检验的工件, 当加载的方法找到规律后, 在生产实际使用中可以使仪器专用化。进一步需要考虑提高工效和操作简便。采用非银盐的记录介质或电子存储处理系统来替代目前的银盐记录介质这一工作有待于进一步实践。

## 参 考 文 献

- [1] Bohn, J. R., Gottenberg, W. G., *International Journal of Non-Destructive Testing*, 4-1 (1972), 1.
- [2] Bruner, R. C. and Krumme, J. B., *Subjects of the Technical Sessions*, 6 ICNT, (1970), 128.
- [3] Collier, R. J., *Optical Holography*, Academic Press, (1971), 438.
- [4] 冶金工业部金属研究所, 《全息照相与无损检验》, 科学出版社, (1973), 26.

# 椭偏光仪和薄膜测量\*

莫 党 朱雅新

## 一、薄膜技术的广泛应用对厚度测量提出的新要求

薄膜技术在近代科学技术中应用很广。在光学部件和仪器中, 薄膜的使用是很重要的; 特别是在激光技术中, 薄膜技术更发展成为制造光学谐振腔等的重要

工艺。在电子器件、金属材料表面保护、摄影、彩色电视、化纤材料、标准计量、物化分析等许多方面, 薄膜都得到愈来愈多的应用。在物理、化学、天文、生物学、医药学等学科中, 薄膜技术也是一种有用的研究手段。

对于半导体器件和集成电路, 当前主要的基础工

\* 1976年7月19日收到。