

# 材料无损检测的全息干涉术

汪爱珠

(合肥工业大学数学力学系)

本文介绍了全息干涉术用于材料无损检测的基本原理、实用工业领域和实验技术,以及国外在全息无损检测中所采用的新器件、新技术、新方法。

## 一、全息无损检测的特点及其应用领域

激光器的应用中全息无损检测是最吸引人的领域之一。高功率氩离子激光器的研制成功,瞬时全息用的光导热塑料记录介质的问世,以及光导纤维和小巧轻便的 CCD 摄像机的使用,为这一新的检测技术进入工业实用阶段,提供了可喜的前景。

全息检测术的特点有:(1)构件表面可为任意形状,也可以是粗糙的;(2)测量灵敏度(测量范围在  $0.1-100 \mu\text{m}$  之间)及分辨率高(小于  $0.01 \mu\text{m}$ );(3)非接触式全场测量,目标大小的变化可达几个平方米;(4)测量结果汇集于一个总的图象里,便于数据采集及处理的自动化;(5)工作时无干扰、无惯性;(6)为振动分析提供了全新的方法。

全息干涉术特别适合对新型纤维强化塑料、复合材料(轮胎、陶瓷及层胶结构)实施无损检测,在工作领域中用于:(1)涡轮机制造业及汽车工业;(2)航空和航天工业;(3)塑料工业;(4)轮胎工业。

应用透射光干涉术可解决的问题有:(1)热工量的测试(热交换、温度场、浓度场、晶核、汽蚀的测定等);(2)流体场的研究(风洞、气流或水流的速度分布等);(3)透明材料的质量监测;(4)环境保护,能源工程。

## 二、基本原理

全息无损检测的原理是:通过外加载荷

(热加载、真空加载、机械力加载、声加载等),使内部有缺陷的试件产生变形,并影响其表面形状。利用两幅或多幅全息图可存储在同一全息底片上的特点,将变形前后的两幅图象在同一张全息底片上进行两次曝光。因物体变形前后的两个物光波的相位相应有了差异,故而发生干涉,形成干涉条纹图。我们即根据此干涉条纹的图形来研究材料的变形情况,从而判断材料的内部状况。

用图相处理技术分析干涉条纹图及计算位移量时,必须明确给出各明、暗条纹的相应级数。

由两次曝光所得到的虚象光强为

$$I = A \cos^2 \frac{\delta}{2}, \quad (1)$$

式中  $A$  与物光及参考光的振幅有关,  $\delta$  为变形前后两个物光波之相位差。

$$\frac{\delta}{2} = N\pi,$$

其中  $N$  为各明、暗条纹相应的级数 ( $N=0, 0.5, 1, 1.5, 2 \dots$ )。整数级对应明条纹,半级级对应暗条纹。根据条纹级数  $N$ , 就可以确定  $\delta$  值。

两次曝光间相位差或光程差的产生,是物体位移所致,故光程差与物体位移之间存在一定的几何关系。

设物体上一点  $P$ , 变形后位置为  $P'$ , 有微小位移  $d(P)$ , 如图 1(a) 所示<sup>[2]</sup>。

位移矢量沿灵敏度矢量方向上的分量可用下式计算:

$$d_i(P) = \frac{N(P) \cdot \lambda}{|S(P)|}, \quad (2)$$

式中  $S(P) = e_o(P) + e_b(P)$ .

由(2)式, 根据全息干涉图各条纹所对应的级数  $N$ , 即可确定在  $S$  方向上的位移分量.

若取照明方向与观察方向重合, 且与被测点的法线一致, 则  $|S| = 2$ , 此时

$$d = \frac{N \cdot \lambda}{2},$$

$d$  即为离面位移.

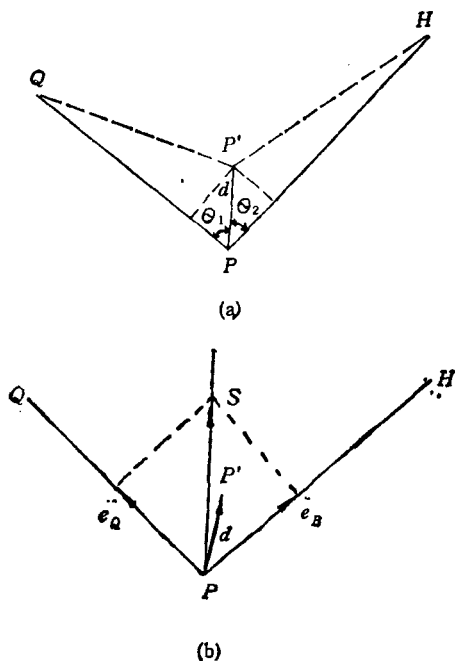


图 1

(a) 光程差分析图; (b) 灵敏度矢量的位置<sup>[3]</sup>  
 $Q$  为照明光源位置;  $e_Q$  为照明方向单位矢;  
 $d$  为位移矢量;  $e_B$  为观察方向单位矢;  
 $H$  为全息底片位置;  $S$  为灵敏度矢量

### 三、计算机辅助分析识别构件缺陷

计算机和图象处理技术在全息无损检测中的应用, 为使其广泛地进入工业界提供了可能. 已有几种方法被尝试或作为设想提出.

#### 1. 由全息干涉图的定性分析来识别缺陷

经验和分析表明, 干涉条纹密集或曲率大处可能存在缺陷. 但是, 仅依此而作为说明缺

陷存在或其分类是不太可靠的. 民主德国科学院自动控制及信息处理中心研究所的 Wilhelmi 及 Eichhorn 发展和实现了基于上述原则的一种缺陷辨识方法<sup>[4]</sup>.

一幅全息图首先由图象处理系统进行预处理和抽取骨架线, 再计算骨架线上各点的曲率值. 根据曲率值对可能存在的缺陷进行初步识别: 将曲率值加权量化, 一方面使得在阈值以下的小曲率线段被视作直线段, 以排除微小干扰及离散效应的影响; 另一方面, 大于阈值的大曲率线不再需要区分或仅作少量计值即可明确地被确定为缺陷. 随后, 按其曲率大小, 取被计值的骨架线上的临界点构成输出图象 (临界曲率图), 采用正方形或圆形窗口在整幅图上滑窗检测, 由窗口中所占有临界点的加权和来实现其密度的评定. 临界点的密度可视为检测窗口的位置函数, 由此又产生了一个亦可作为图象说明的、与位置有关的函数 (密度图). 密度图多半有较少的曲线, 且不清晰, 其平滑度主要取决于检测窗口的大小及形状. 对不同类型的缺陷采用不同阈值分步分析密度图, 即可标定缺陷部位.

#### 2. 全息干涉图的定量分析用于缺陷识别

计算机及图象处理技术的应用, 使全息图自动计值 (定量分析) 得以实现. 目前, 大多采用人机对话形式, 通过给出零级条纹所在位置及条纹变化趋势来采集条纹级数数据, 再计算变形并作三维显示. 通常情况下, 零级条纹及条纹变化趋势较难掌握. 因此, 条纹自动识别的方法及有关软件正在被探讨和研制 (如相位移法). 设想在求得有缺陷构件的变形后, 微分导出相应的应变值, 选取适当的应变值阈值, 作为判定缺陷存在的依据. 无疑地, 此法实施起来代价较高, 也比较复杂, 但准确性好.

#### 3. 频谱分析法用于缺陷识别

一幅离散了的数字化图象, 其离散的傅里叶变换对可由下式给出<sup>[5]</sup>:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \times$$

$$\exp\left[-22j\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)\right],$$

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v)$$

$$\times \exp\left[22j\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)\right].$$

在离散的情况下,不必考虑傅里叶变换的收敛性。与连续情况类似,  $F(u, v)$  亦为离散函数  $f(x, y)$  的频谱函数,唯一的区别是独立变量是离散的。

联邦德国的 Th. Kreis 在用频谱分析法识别试件缺陷方面做了大量工作<sup>1)</sup>。其基本依据是:两次曝光法所拍摄的有缺陷试件的全息图的频谱偏离无缺陷试件的频谱。

用  $d$  表示振幅谱的偏离程度,不同情况,  $d$  的表达形式亦不同。以轴向拉伸试件(一维问题)为例,

$$d_1 = \frac{1}{N - n_0 + 1} \sum_{i=n_0}^N [S_0(u_i) - S_1(u_i)]^2, \quad (3)$$

式中  $S_1(u)$  为待比较的振幅谱,  $S_0(u)$  为标准振幅谱,  $N$  为傅里叶变换中扫描值的半数,  $n_0$  为避免基频成分的影响而选取的大于 1 的数值(通常在 2—6 之间选取)。实验表明,即使每次试验条件不可能完全相同(支承的微小移动、载荷的微小变化),但是对  $d_1$  的值影响很小,故以  $d_1$  作为判据是有力的。一般地,  $d_1 > 4.0$  时,

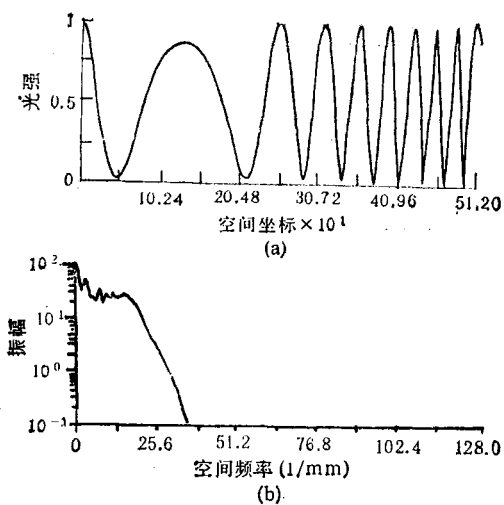


图2 轴向拉伸标准试件的频谱图

待检试件中存在缺陷。图 2, 3, 4 分别给出标准试件及有缺陷试件的一维频谱图。

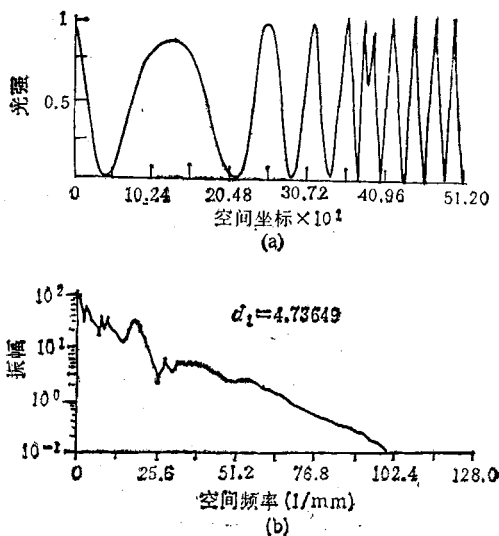


图3 轴向拉伸有缺陷试件的频谱图  
(实验条件同图2, 缺陷区变形幅度为  $1 \mu\text{m}$ )

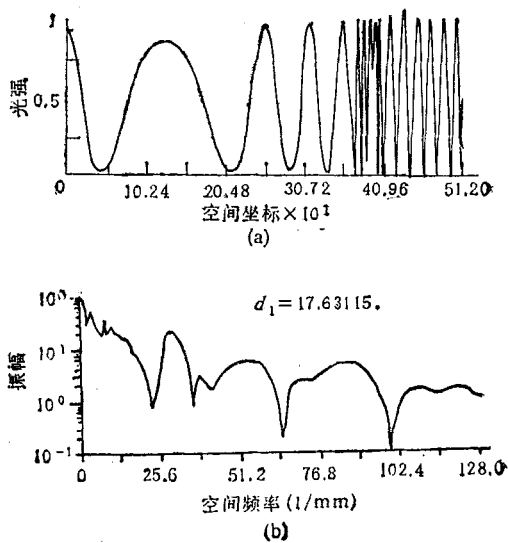


图4 轴向拉伸有缺陷试件的频谱图  
(实验条件同图2, 缺陷区变形幅度为  $5 \mu\text{m}$ )

比较图 3 和图 4 可知,试件缺陷区变形幅度对  $d_1$  值影响较大。

同样,上述原理可推广到二维情况,比较标准试件及有缺陷试件的两维振幅谱,以判定缺陷之所在。但是实际上,因为傅里叶变换是通

1) W. Jueptner and Th. Kreis, Bericht zum DFG-Forschungsvorhaben, cr 4/6, (1984).

过整个全息图对每一空间频率的分量求平均, 而由缺陷导致的高频分量相对于其余部分要小得多. 由此推知, 狭小缺陷对二维振幅谱的影响较小, 有时不能很好地作为检测缺陷的依据.

另一可能实行的方法是: 分别计算二维全息图上所有平行列(或行)的平均振幅谱, 比较二者的偏离程度. 此法对背景强度变化及散斑噪声不敏感, 对缺陷的识别能力较强. 但是, 若全息图上的条纹走向改变较剧烈时, 则不适合.

#### 四、有关实验的初步探讨及实用前景展望

##### 1. 加载方式的正确选择

在对一给定的结构进行实验时, 全息无损检测术的可行性首先在于加载技术, 以使结构在加载后能根据变形状态来区分完好区和缺陷区. 所以, 必须按照物体的结构特性和所用的材料以及所怀疑的缺陷的类型, 来确定加载方式.

(1) 由传热系数不同的两种材料胶合成的叠层结构, 可采用热加载.

(2) 结构复杂、复合材料制成的叶片, 因脱胶和空隙易于使之振动, 故用超声激振(声加载)为好, 可采用大大低于普通超声试验时所用的频率. 这样, 晶粒散射、声衰减、表面粗糙度及复杂几何关系等影响全都大为减小<sup>[6]</sup>.

(3) 依据物体的几何形状和被测缺陷的类型施加简单机械力或用机械式激振器对构件作振动分析, 即为机械加载.

(4) 压力加载(真空法)适用于橡胶轮胎和各种蜂窝结构的胶结材料. 待检材料与全息摄影干涉仪都置于一个真空室中, 第一次曝光在大气压下被记录, 第二次曝光则在具有一定负压的真空室中进行. 真空度的大小视材质的硬度而定.

图5为有缺陷的汽车轮胎在真空加载时拍摄的全息干涉图.

##### 2. 全息测试光路的优化问题

全息干涉光学系统的优化, 可提高缺陷检

物理

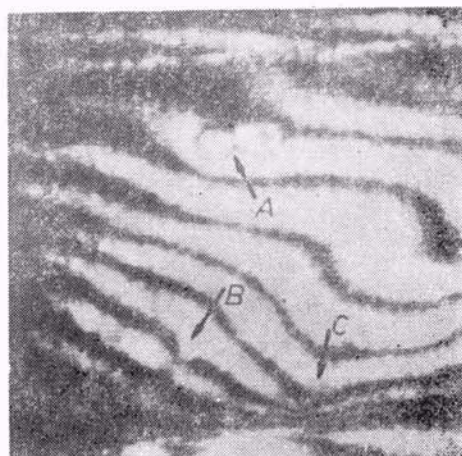


图5 具有局部缺陷的汽车轮胎  
A为脱胶部位; B为疲劳部位; C为裂纹处

测的概率. 在通常的由全息图直接判定缺陷的方法中, 待测试件、照明及观察方向之间的相互位置的配置, 应使该干涉仪具有良好的灵敏度, 即使得试件变形与灵敏度最大的方向( $S$ )相一致.

运用频谱分析法时, 光路的优化, 应使得一幅无缺陷试件的干涉条纹图的条纹密度在整个被观测的范围内几乎近于常数. 此时, 衡量振幅谱偏离量大小的 $d$ 将明显地增加. 与图3相

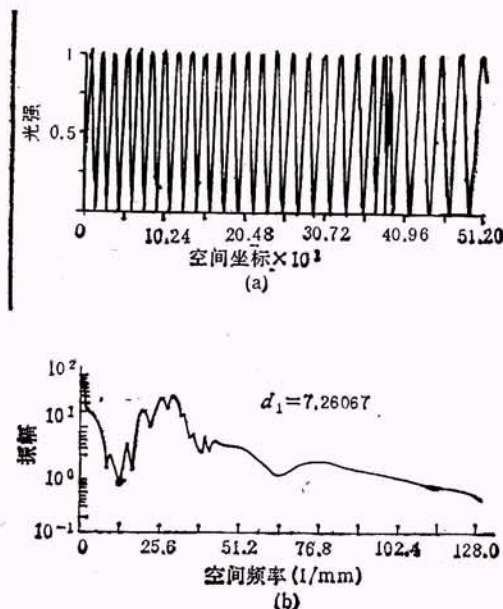


图6 有缺陷试件的频谱图  
(缺陷区变形幅度为  $1\ \mu\text{m}$ )

比,在实验条件相同、缺陷区变形幅度相同时,采用优化光路得到的频谱图(图6)有较大的 $d$ .

### 3. 实用前景展望

现阶段,我国的全息无损检测尚未能进入现场实用,因为脉冲激光器的可靠性问题和理想的记录介质问题尚有待解决.十多年来,山西大学光导体研究室和中国人民解放军军事医学科学院激光室的科研人员致力于研制一种理想的、使用方便的光导热塑料及控制仪器,现已取得可喜成果.图相处理技术与光测手段相结合,可解决无损探伤中的缺陷识别及监控问题.电子散斑干涉计量用于无损检测等最新测试手段,在国内均已被问津.如果坚持下去,不久的将来,我国会有自制的、能在现场应用的全息检测系统.随着新材料的不断诞生,各行各业,尤其是航空航天和轮胎质量监测部门,将日益会感到全息无损检测的重要性.

迄今为止,国外的全息无损检测术也还没有为工业界普遍接受.脉冲激光器及大功率氩离子激光器价格昂贵和全息系统非标准化等问题,阻碍了实用化进展.但也不乏例外,如轮胎测试系统已经商品化,并有几家公司已为汽车、飞机、机床制造业提供了标准化的全息系统.

目前,国外有关专家所进行的工作重点大致有下列几个方面.

(1) 研制实用的检测设备,使全息系统日趋灵巧轻便,实现组件化.

1987年在慕尼黑举行的激光博览会上,Rottenkolber公司展出了第一台组件式全息测试系统.它的测量头大小如摄像机,可在很

大范围内移动.大功率的氩离子激光器及光路系统被安置于一手推车上,可随意挪动位置.在这套设备中,第一次在商品全息系统中使用光纤.

(2) 进一步发展光导热塑全息记录介质以及有关的计算机和图象处理技术.

(3) 推进电子散斑干涉术(ESPI)进入工业实用.

ESPI既保持了普通散斑干涉计量的优点,同时还具备较多优点:因采用摄像机直接接收图象,可省去显影、定影等复杂过程;用图象相减法(或相加法),可实时观察到静态(或动态)位移的相关条纹,并能快速进行自动处理.整个过程直观、迅速,且储存方便.联邦德国、美国、英国的一些公司和大学业已先后推出ESPI产品,1987年慕尼黑的激光博览会上,就有该产品的展出.

据国外有关专家估计,今后几年,全息检测术将会有很大突破.大功率激光器的昂贵价格及全息检测的实用性可望在五年内解决.随着新材料的不断涌现及安全生产的需求,作为高技术手段的全息检测术将起着重要的作用.

- [1] H. Rottenkolber, *Laser Magazin*, 2(1987), 26.
- [2] 张如一、陆耀楨主编,实验应力分析,机械工业出版社,(1981), 328.
- [3] G. Wernicke and W. Osten, *Holografische Interferometrie*, VEB Fachbuchverlag, Leipzig, (1982), 74.
- [4] N. Eichhorn et al. *Acta Polytechnica Scandinavica*, No. 150(1985), 88.
- [5] [美] R. C. 冈萨雷斯, P. 温茨著,李叔梁等译,数字图象处理,科学出版社,(1982), 47页.
- [6] [美] R. K. 厄尔夫主编,王致新译,全息无损检测,机械工业出版社,(1982), 337.

(上接第59页)

激光平均分成两束,再分别用二透镜(16)聚焦在 $^{238}\text{U}$ 和 $^{235}\text{U}$ 空心阴极灯(6, 8)的阴极孔穴中,用扫描电子仪(9)在待测波长附近30GHz光谱范围内进行激光波长的精细扫描.激光共振辐射产生的光电流信号分别由双灯的阳极输出,并分别送入两台锁定放大器(2, 4)中放大,最后在记录仪(3)上合并、记录,得到由 $^{238}\text{U}$ 和 $^{235}\text{U}$ 空心阴极灯产生的两个强信号形成的同位素位移光谱.

表1给出了用本方法测得的几个典型的铀原子跃迁的 $^{238}\text{U}$ - $^{235}\text{U}$ 的光谱位移(包括一个零位移), $^{235}\text{U}$ .

的超精细结构光谱总宽度和 $^{238}\text{U}$ 谱线的半宽度.与其他方法所得的数据对照,结果是满意的.

- [1] H. -P. V. Böhm et al., *Opt. Commun.*, 26(1978), 177.
- [2] R. A. Keller et al., *J. Opt. Soc. Am.*, 69(1979), 738.
- [3] L. J. Radziemski et al *Opt. Commun.*, 15(1975), 273.

(中国科学院长春应用化学研究所  
金巨广 王松岳 孙孝忠 徐俊  
王秀兰 金昌泰 生明涛)