

无损检测技术丛书

激光全息检验

国防工业出版社

73.7709
113

无损检测技术丛书

激光全息检验

王永保 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

激光全息检验是六十年代发展起来的新的无损检测技术。通过对物体施加载荷,使其表面产生微小变形,利用激光全息照相来记录并比较这种变形,从而判断出物体内部的缺陷。

本书简要地介绍用激光全息照相术作为无损检验的方法来检验产品的质量。全书共分四部分。第一部分概略地介绍激光全息检验的基础知识;第二、三部分介绍激光全息检验中常用的几种激光器和全息照相装置;第四部分介绍激光全息检验方法并列举了一些应用的实例。

本书适用于从事无损检测工人、技术人员和管理人员阅读,也可供有关专业技术人员参考。

无损检测技术丛书 激 光 全 息 检 验

王永保 编著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张 3 65千字

1985年10月第一版 1985年10月第一次印刷 印数: 0,001— 3,040册

统一书号: 15034·2893 定价: 0.60元

前言

无损检测是一门新兴的综合性科学技术。它以不损坏被检对象的使用性能为前提，应用物理和化学知识，对各种工程材料、零部件和产品进行有效的检验和测试，借以评价它们的完整性、连续性、和其它物理性能。无损检测是实现质量控制、保证产品安全可靠、节约原材料、改进工艺、提高劳动生产率的重要手段，目前已成为产品制造和使用中不可缺少的组成部分。

现代科学技术的发展，为无损检测提供了新的理论和物质基础。目前能够在生产中应用的已有五十多种检测方法，在一些领域中还实现了由电子计算机控制的自动化。在我国实现四个现代化的进程中，无损检测技术的应用已日益受到重视，并有着广阔的发展前景。

为普及和推广无损检测技术，我们编写了一套《无损检测技术丛书》。这套丛书有如下十个分册：

- 超声检测；
- 射线检验；
- 磁粉检验；
- 涡流检测；
- 渗透检验；
- 声发射检测；
- 激光全息检验；
- 微波和红外检测；

8410102

胶接结构与复合材料的无损检测；

无损检测自动化与信息处理。

编写这套丛书所选取的资料，一部分来自生产、科研实践；一部分参阅了国内外有关的技术书刊。在编写过程中，曾得到编写组各成员所在单位的大力支持。本分册的编写还得到了 621 所、303 所、曙光橡胶所、广州电子技术所、北京化工学院、南昌航院、西安空军工程学院、西安光机所、郑州工学院、132 厂、372 厂、172 厂等单位的有关同志热情支持，提供了宝贵的资料和经验，陈积懋和邓日红同志审阅了书稿，在此向有关单位和同志表示衷心感谢。

由于水平所限，书中缺点错误在所难免，欢迎读者批评指正。

《无损检测技术丛书》编写组

目 录

概述	1
一、什么是激光全息检验	1
二、激光全息照相的原理和特点	3
激光全息检验用的光源	14
一、氦-氖激光器	14
二、红宝石激光器	18
三、氩离子激光器	21
激光全息检验的照相装置及要求	22
一、激光全息照相过程及所用元器件	23
二、拍摄激光全息照片的要求	30
激光全息检验方法和应用	43
一、检验方法	43
二、加载方式	46
三、激光全息检验的应用	51

概 述

一、什么是激光全息检验

激光全息检验是利用激光全息照相来检验物体表面和内部的缺陷。它是将物体表面和内部的缺陷，通过外界加载的方法，使其在相应的物体表面造成局部的变形，用激光全息照相来观察和比较这种变形，然后判断出物体内部的缺陷。

因为物体在受到外界载荷作用下会产生变形，这种变形与物体是否含有缺陷直接有关，在不同的外界载荷作用下，物体表面变形的程度是不相同的。利用激光全息照相，记录在不同外界载荷作用下的物体表面的变形情况，进行观察和分析，就可以确定出物体的缺陷。

激光全息检验实际上是一种全息干涉计量术。全息干涉计量术是激光出现以后在激光全息照相应用领域中发展最快、又较为成熟的一种技术。它不但可以用来进行振动分析，摄取流体的速度场以及密度分布和子弹飞行时的冲击波，而且可以用来检验零件的形状及零件表面和内部的缺陷。激光全息技术能够检验金属材料和非金属材料的缺陷；也能检验诸如蜂窝夹层结构、迭层胶接结构、复合材料结构和橡胶轮胎制品的脱粘缺陷和薄壁高压容器的焊缝裂纹等缺陷。目前已有大小不同的“蜂窝夹层结构全息照相分析仪”可以按每分钟 300 多平方厘米的速度检验平面或曲面零件。对于轮胎的检测也有了较完善的全息检测设备，其加载的方式已由早

8610163

期的轮胎内部充气加载发展到抽真空加载，由一般的手动控制检验发展到自动控制，以适应大批量航空轮胎和高速公路轮胎生产的需要。目前检验轮胎的速度已达到每分钟一个。

激光全息检验与其它无损检验方法（如声学法、热力学法、射线法等）相比较，其特点为：

（1）由于激光全息检验是一种干涉计量术，其干涉计量的精度与波长同数量级。因此，极微小（微米数量级）的变形都能被检验出来，检验的灵敏度很高。

（2）由于激光的相干长度很大，因此，可以检验大尺寸的物体，只要激光能够充分照射到的物体表面，都能一次检验完毕。

（3）激光全息检验对被检对象没有特殊要求，可以对任何材料、任意粗糙的表面进行检验。

（4）可借助干涉条纹的数量和分布状态来确定缺陷的大小、部位和深度，便于对缺陷进行定量分析。

此外，这种检验方法还有直观感强、非接触检验、检验结果便于保存等特点。

但是，物体内部的缺陷能否被检验出来，要取决于物体内部的缺陷在外力作用下能否造成物体表面的相应变形。如果物体内部的缺陷过深或过于微小，那么，激光全息照相这一种检验方法就无能为力了。对于迭层胶接结构来说，检验其脱粘缺陷的灵敏度取决于脱粘面积和深度的比值，在近表面的脱粘缺陷，即使脱粘面积很小，也能够被检验出来，而对于埋藏得较深的脱粘缺陷，只有在脱粘面积相当大时才能够被检验出来。

激光全息检验目前多在暗室中进行，并需要采取严格的隔振措施。因此，如何走出暗室，离开隔振平台，在现场进

8710102

行检验，这是一个普遍关心的问题。为此，采用脉冲激光器进行全息检验，是一项急需解决的任务，目前在这方面的研究工作虽然已有了一些进展，但还有不少问题有待研究和解决。

激光全息检验是在1960年激光问世以后才发展起来的一种新的无损检测手段，虽然发展速度较快，但相对于常规的无损检测方法来说，还是相当年青的。无论在应用的范围、检验的方法以及所用的器件、设备和记录介质等方面都还有待于进一步的研究、提高和完善。

二、激光全息照相的原理和特点

激光全息检验实际上就是将不同受载情况下的物体表面状态用激光全息照相的方法进行比较和分析，从而检验出物体的缺陷。为了了解这种检验方法的实质和特点，应该对激光全息照相的原理和特点有所了解。

我们知道激光是由原子受激发射产生的。原子受激发射时发出的光子和引起受激发射的外来光子在频率、振动方向和位相等方面完全一样，这就使得激光具有一系列极为优异的特性。

(1) 相干性 对普通光源来说，同一光源上不同点发出来的光是相互独立的，即没有相干性。但是，激光器发出的整束激光的不同部分都有很好的相干性。

(2) 单色性 单色性就是指光的波长只有严格的一种。过去人们制造的最好的单色光源——氪灯，所发出波长为6057.8021埃的橙色光，也还有一个波长变化为0.0047埃大小的范围。与此相比，对于激光，如氦-氖气体激光器所发出的红色光的波长为6328埃，其波长的变化范围可小于

10^{-7} 埃，它的单色性比氪灯提高了约十万倍。

(3) 方向性 一般光源发出的光均匀地向四面八方照射，但是激光却只向一个方向发射，其发射角（光束的散开角度）很小，只有几分，甚至可以小到 1 秒，几乎是一束平行光束。

由于光束极窄，光能量可以高度集中。例如一台大功率的红宝石激光器，每平方厘米的输出功率达 10^9 瓦，其亮度可达 10^{14} 瓦/厘米·立体角，它比高压脉冲氙灯的亮度高 37 亿倍，比太阳的亮度还要高 200 亿倍。

激光全息照相就是利用上述特点进行的。

1. 激光全息照相原理

图 1 是全息照相记录过程的原理图。当激光束 1 从激光器发射出来后，经过分光镜 2 被分成两束光。一束由分光镜表面反射，经过反射镜 4 到达扩束镜 5，将直径为几个毫米的激光束扩大照射到整个物体 6 的表面，再由物体表面漫反射到

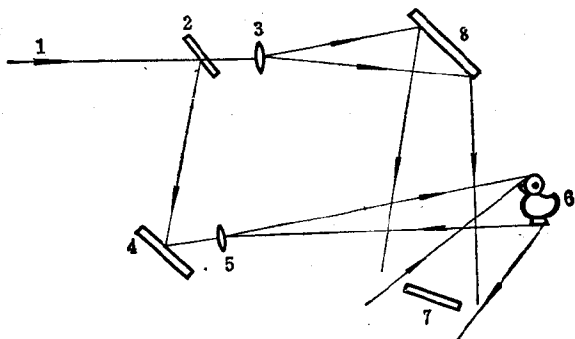


图 1 全息照相记录过程原理图

1—激光束；2—分光镜；3、5—扩束镜；

4、8—反射镜；6—物体；7—胶片。

胶片 7 上, 这束光称为物光束; 另一束光透过分光镜后, 被扩束镜 3 扩大, 再经反射镜 8 直接照射到胶片 7 上, 这束光称为参考光束。当这两束光波在胶片上迭加后, 形成干涉图案, 胶片经过显影、定影处理后, 干涉图案就以条纹的明暗和间距变化的形式被显示出来, 正是这些干涉条纹记录了物体光波的振幅和位相信息。

为了理解全息照相的记录过程, 下面简要介绍光的干涉原理。

按照电磁波理论, 表示光波中电场 $\vec{E}$ 的波动方程应为

$$\vec{E} = A_0 \cos \omega t$$

其中 A_0 是光波的振幅, 它代表电场 $\vec{E}$ 的最大值。振幅是描述光波振动的一个重要的物理量, 其大小决定光的强弱, 通常以振幅的平方来表示光波的相对强度 I , 即 $I = A_0^2$ 。

描述光波振动的另一个重要的物理量位相 ωt (ω 为圆角频率, t 为时间)。它表示在一个波长 λ 范围内各点电场的大小, 位相都是以角度来表示的。但位相这个物理量更主要的还是用来分析两个光波在迭加时的情形。例如有两个波长相同的光波迭加时, 它们的位相相同, 也就是光波的波峰和波谷是一一对应的, 如图 2(a) 所示, 当它们迭加在一起后, 所合成的光波振幅就互相迭加而增强;

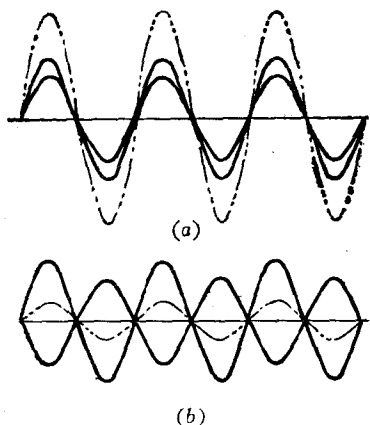


图 2' 光波的迭加

如果两个光波的位相相反，即一个光波的波峰落在另一个光波的波谷中，如图 2(b) 所示，则合成的光波的振幅就互相抵消而减弱。因此，根据两个光波的位相是相同还是相反，就可得到合成后的光波是加强还是减弱。我们把光波在空间迭加而形成明暗相间的稳定分布现象叫做光的干涉。

值得注意的是，并非任意两列光波相遇时都能产生干涉现象。从两个完全独立的光源（如两盏油灯或日光灯）发出的光波即使相遇，我们看到的只是各处光强的增加，而产生不了干涉现象。为了产生干涉现象，相遇的光波必须满足以下相干条件：

(1) 频率相同的两束光波在相遇时有相同的振动方向和固定的位相差。

设有两束相干光波，其波动方程分别为：

$$E_1 = A_1 \cos(\omega t + \alpha_1)$$

$$E_2 = A_2 \cos(\omega t + \alpha_2)$$

式中 A_1 、 A_2 分别为两束光波的振幅； α_1 、 α_2 分别为两束光波的初位相；圆频率 $\omega = 2\pi\gamma$ ， γ 为光波的频率。因为两束光波为相干光波，故频率相同，而且它们的振动方向相同，因此在空间相遇迭加时，可以用代数和来计算。即

$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 \\ &= A_1 \cos(\omega t + \alpha_1) + A_2 \cos(\omega t + \alpha_2) \end{aligned}$$

其中 A_1 和 A_2 以及 α_1 和 α_2 都是常数，经演算后可得：

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\alpha_2 - \alpha_1)$$

或写成 $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\delta$

其中 $\delta = \alpha_2 - \alpha_1$ 是两束光波在相遇点的位相差。

因为光强等于光波振幅的平方，故上式可改写成：

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos\delta$$

其中 I_1 和 I_2 分别为两束光波单独存在时、在相遇点处的光强。此式表明，相遇点的光强度 I 取决于两束光波在该处的位相差 δ 。当位相差 δ 为 π 的偶数倍时 即 $\delta = 2\pi k$ ($k = 0, 1, 2, \dots$)，则光强度有最大值：

$$I_{\text{最大}} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$$

而当位相差为 π 的奇数倍时，即 $\delta = (2k + 1)\pi$ ，则光强度为最小值：

$$I_{\text{最小}} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$$

若 I_1 和 I_2 相等，则 I 最大值为单独一束光波光强度的 4 倍，而最小值为零。

至于位相差为其它值时，该点的光强度可按 $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$ 式子确定。

(2) 两束光波在相遇处所产生的振幅差不应太悬殊。

若两束光波的振幅相差太大，例如 $A_1 \gg A_2$ ，则该处合成振动的振幅 A 将与单一光波在该处的振幅 A_1 没有多大差别，因而也就观察不出明显的干涉现象。

(3) 两束光波在相遇处的光程差即两束光波传播到该处的距离差值不能太大。

因为实际光源所发出的光波是一系列有限长的波列。当两束光波在相遇的光程差不大时，则两束光波中有固定位相差的波列同时作用于一点，能产生清晰的干涉现象。而当光程差很大时，一束光波的波列已通过，而另一束光波相应的波列尚未到达，两个相应的波列间没有重叠，因此产生不了干涉现象。

图 3 表示两个平面光波的干涉情况。其中一个代表物体光束，另一个代表参考光束。这两束光波的夹角为 θ 。当它们在胶片上相遇迭加时，就产生了一组互相平行、明暗间隔

在两束平面相干光波中产生的干涉现象。在实际情况中，物体的表面光波并不是一个简单的平面光波，而是形状复杂得多的光波，而且参考光波也不一定都是平面光波。所以，它们迭加时，所产生的干涉图案也就非常复杂。但是，它的原理却是相同的。也就是说，当物体光波和参考光波到达胶片某处的位相一致时，产生相长干涉，组成干涉图案中的亮条纹；在另外一些地方，两束光波若以相反位相到达时，产生相消干涉，组成干涉图案中的暗条纹；如两束光波到达胶片某处的位相既不相同，也不相反，则形成干涉条纹的亮度相应地介于上述两种明、暗条纹之间。条纹的间距取决于在该处发生干涉的两个光波之间的夹角，夹角大的地方，条纹细密，反之，夹角小的地方，条纹间距就大。因此，在整个胶片上就形成了一些明暗不一、间距不等的干涉条纹，犹如许多花纹和斑点交织的图案。这样，通过胶片上的干涉条纹把物体表面光波的振幅和位相这两个信息都记录下来了。这种胶片经过显影，定影处理后，就叫做全息图。从全息图的外表特征来看，只是记录了一些干涉条纹，这些条纹看上去似乎是极不规则的，丝毫也看不出被记录的是些什么物体。事实上，这些“极不规则”的条纹却是物体表面光波全部特征的真实记录。正是由于物体表面凹凸不平、前后位置不同以及各处反光本领大小不一，才使得物体表面光波传播到胶片时的振幅和位相不同，当与参考光产生干涉时才形成了这样明暗不一、间距不等，看上去“极不规则”的条纹。

为了看到全息图上记录的物体象，就必须用一束相干光波（亦称再现光波）去照射全息图，如图4所示。由于全息图是由许许多多的明暗干涉条纹组成，当再现光波照射到暗条纹处，光波被挡住透射不过去，而照到亮条纹处就能透过。

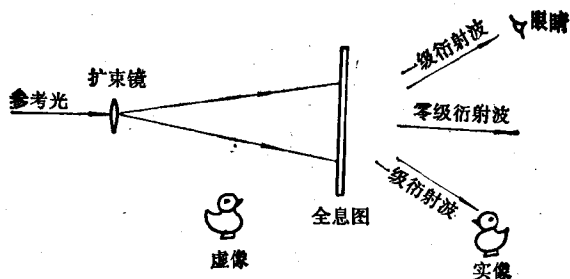


图4 全息照相再现过程原理图

而且干涉条纹分布极其细密，因此全息图犹如一个极其复杂的光栅，当再现光波照射时，光波就会产生衍射现象[●]，出现许多衍射波。其中沿着再现光波照射方向传播的光波称零级衍射波；在零级衍射波两侧有两列一级衍射波；此外，还有二级、三级衍射波等等，但由于它们的光强度很快被衰减而无法看见。在这两列一级衍射波中，其中一列构成原来物体的初始象（通常称为虚象）；另一列一级衍射波构成物体的共轭象（通常称为实象），如果在实象处放置一个屏，就可在屏上直接接受物体的象。

如果再现时所用的相干光波就是原来记录过程中所用的参考光波，那末，再现的物体光波（虚象）就出现在原来记录过程中物体所处的位置，再现的物体象也和原来的物体光波完全相同，是一个三维的立体象。

- 用单色光照射一个宽度很小的狭缝，在狭缝后放置一个屏。按光的直线传播概念，在屏上看到的应是狭缝投影而成的一亮条。但实际观察到的却是一组明暗交替的条纹，中央亮条的亮度最高，两侧各条纹亮度依次渐弱，这就是光的衍射现象。各级亮条纹称为衍射波。

为了清楚理解全息照相的记录和再现过程，可以用数学式子来说明。

假设光波 O 为来自物体投射到胶片 H 上的相干光波；光波 R 是与光波 O 相干涉的参考光波，如图 5 所示。在 H 上总的光场是 $O + R$ 。为讨论简单起见，只考虑光波的振幅和位相沿 x 方向变化，并用复数形式来描述，则

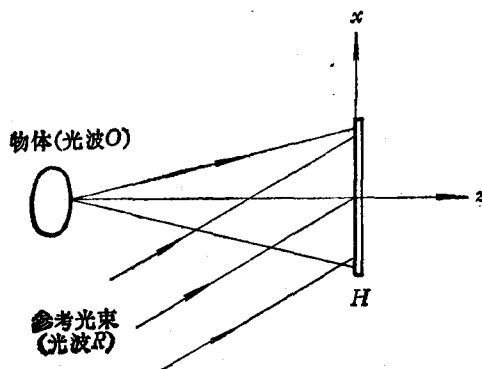


图 5 物光与参考光迭加

$$O(x) = O_0(x) e^{i\phi_0(x)}$$

式中 $O_0(x)$ 代表物体光波的振幅， $\phi_0(x)$ 是光波的位相；

$$R(x) = R_0(x) e^{i\phi_R(x)}$$

式中 $R_0(x)$ 代表参考光波的振幅， $\phi_R(x)$ 是光波的位相。

在胶片 H 处，物体光波和参考光波产生干涉现象，所得到的光强分布是

$$\begin{aligned} E(x) &= |H(x)|^2 = |O(x) + R(x)|^2 \\ &= O_0^2(x) + R_0^2(x) + 2O_0(x)R_0(x)\cos[\phi_0(x) - \phi_R(x)] \end{aligned}$$

式中第一、第二两项是物光和参考光的强度，第三项的大小