

# 激光全息无损检测技术的现状及展望

陈桂才 吴东流 井立 程茶园 黄振佳

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 叙述了激光全息无损检测技术国内外的发展情况及其在军工生产和科研领域等的应用,通过与其他无损检测方法相比较,总结了该方法在无损检测领域的地位及优势,并预测了激光全息无损检测技术的发展趋势。

**关键词** 激光全息,无损检测,应用,优势,发展趋势

## Status and Prospect of Laser Holography in Nondestructive Testing

Chen Guicai Wu Dongliu Jing Li Cheng Chayuan Huang Zhenjia

(Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** This paper describes the application in the military project and scientific research fields and development of laser holographic nondestructive testing(NDT) at home and abroad. Its predominance and position in NDT is summarized in contrast with other NDT methods. The developing trend of laser holography is predicted.

**Key words** Laser holography, Nondestructive testing(NDT), Application, Predominance, Developing trend

### 1 引言

近十年来,无损检测(NDT)技术及设备无论在检测速度、精度,还是功能上都有了很大的改进,NDT技术及设备不断地更新,新的NDT技术不断地涌现。目前,除了超声、射线、磁粉、渗透、涡流等常规无损检测方法外,激光全息法、核磁共振法、共振超声法、热图法以及剪应力图法等新的NDT方法得到了迅猛发展和广泛应用,但激光全息法与其他新的NDT方法相比,发展较早、技术较成熟,应用范围较广。本文将对激光全息无损检测技术的现状、地位及优势进行论述。

### 2 激光全息技术发展概述

国外激光全息无损检测技术的发展始于上世纪60年代。检测对象也是在蜂窝结构、轮胎、涡轮叶片、药柱包覆层等,研究方向与我国情况相仿,如用热加载法检测直径为2.7 m的宇宙天线;用大功率

脉冲激光全息干涉法检测面积为1.80 m×6.6 m大型机翼叠层结构,GCO公司为这类检测制造了专用设备<sup>[1]</sup>。国外研究者非常重视激光全息干涉方法和仪器系列化研究,其仪器产品更新速度非常快<sup>[2]</sup>,研究了几种补偿技术消除或削弱了激光全息干涉系统对防震平台的依赖,推广了剪切散斑干涉技术在无损检测领域的应用<sup>[3]</sup>。

激光全息无损检测技术在我国的发展应用始于1974年。当时天津大学与南昌洪都机械厂合作,用He-Ne激光器做光源,研制了一台JD-II型全息干涉仪,用于强-5飞机上铝面板蜂窝夹层结构的检测。从此,许多厂所院校进行了激光全息无损检测的研究,解决了常规无损检测方法无法解决的问题。一些项目已用于生产实际,如航天材料及工艺研究所成功地将激光全息无损检测用于电铸件及火箭固体推进剂药柱包覆层的质量检测,并形成了行

收稿日期:2002-07-16;修回日期:2002-09-20

陈桂才,1976年出生,硕士,主要从事激光全息无损检测技术的研究工作

业标准。20世纪80年代中期,郑州工学院和桂林曙光橡胶研究所研制的 SJQL—1500 I 型轮胎全息无损检测仪已应用于飞机轮胎生产的实际质量检测。在此基础上研制成功的 SJQL—1500 II 型轮胎激光全息无损检测仪达到了20世纪80年代末期同类产品的国际先进水平。

为了摆脱激光全息无损检测对防震的要求,西安光学精密机械研究所研制成功了一种高分辨顺态全息干涉系统,用来测量固体火箭发动机的喷流特性取得成功。该系统能完成单脉冲、双脉冲和多脉冲全息干涉图像的摄制,为全息无损检测走出实验室用于现场检测提供了硬件设备<sup>[4]</sup>。

### 3 激光全息无损检测的原理和方法

激光全息无损检测是利用全息干涉计量技术,把相干性好的激光照射到物体表面,通过热加载、流体压力加载(正负压力)、机械加载等加载方式使被检物体表面产生微小变形,比较被检物体加载前后的两组光波波前的形状,根据干涉条纹有无异常变化判断被检物体内部是否有缺陷。全息干涉计量的方法有实时法、二次曝光法和时间平均法。常用的方法为前两种,用实时法确定加载条件,用二次曝光法进行记录和分析。光路图如图1所示。

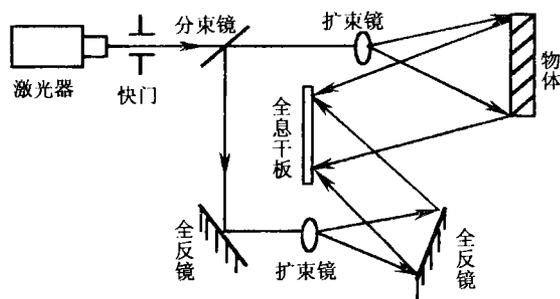


图1 激光全息干涉光路图

Fig.1 Chart of laser holographic interferometry

## 4 激光全息无损检测的应用

### 4.1 轮胎质量的检测

轮胎在生产过程中,由于技术、工艺、材料、环境等因素的影响,不可避免地产生气泡、脱层等缺陷,常规的检测仪器不能检测出来,造成潜在的废品出厂,形成事故的隐患。激光全息无损检测技术应用于轮胎质量检查,采用真空加载双曝光干涉计量方法进行无损检测,可检测出轮胎内部脱层、气泡等缺陷

陷,检测出的最小缺陷范围为  $\Phi 2 \text{ mm} \sim \Phi 3 \text{ mm}$ 。李进业<sup>[5]</sup>采用轮胎内外检测的方法,研究了激光全息无损检测中的光路布置及其与全息图像清晰度的关系,并且讨论了不同尺寸轮胎内壁检查的三种光路设计。另外,激光全息无损检测还可应用在翻胎质量检查上。文献<sup>[6]</sup>表明,翻新胎的气泡一般产生于两个部位:一是由于欠疏、胎面胶配方不合理、胶料混炼不均造成的胶面气泡;二是帘布层(加强层)气泡,轮胎在使用寿命期内的各个阶段脱层和气泡都不停的形成和扩大,一条本来没有脱层的轮胎,在第一次翻新没有脱层,但第二次、第三次翻新时就有可能在胎体内产生大量的脱层。

### 4.2 复合材料及其制件的质量检测

激光全息无损检测适合检测复合材料层压板的脱粘分层、树脂堆积、密度变化、裂缝和形变等缺陷,该方法还成功地应用于金属蜂窝胶接件的脱粘、蜂窝塌陷等的缺陷检测。对碳纤维层合板可检测出1 mm深、 $\Phi 5 \text{ mm}$ 以上的分层;对蜂窝夹层结构件,面板厚度小于1 mm时,可检出 $\Phi 10 \text{ mm}$ 以上的分离型缺陷和 $\Phi 15 \text{ mm}$ 以上的紧贴型缺陷,并可显示蜂窝芯拼接情况,而且通过对全息图干涉条纹的观察、分析还可判断胶接强度的高低<sup>[7]</sup>。Aquitaine工厂曾成功地将激光全息照相法应用于缠绕压力容器的无损检测,他们将压力容器放在一个转动的台架上,激光光源置于容器之外,在容器内有两套光学系统同时进行前、后封头区域的检测,得到了逼真的干涉图像。

### 4.3 火箭推进剂药柱包覆层粘接质量的检测

固体推进器是由外壳、绝热层、包覆层及火药柱等组成,技术要求是各层界面之间无脱粘伤缺陷,否则就会产生串火现象,不但影响推进器的性能,严重时会导致推进器爆炸。常规的X射线只能检测出药柱内的气泡和夹杂等缺陷,而对脱粘缺陷却难以检查。若用超声检测则需用耦合剂,而火药柱一般不允许有溶剂接触,因此采用激光全息对药柱进行检测行之有效。航天材料及工艺研究所采用He-Ne激光器做光源,真空加载方式,采用双光路系统和二次曝光法,成功地对大型固体药柱(直径为400 mm,长1 650 mm,质量达400 kg)进行了检测。采用分体式隔振平台和双光路布置解决了激光功率与隔振平台对被检火药柱尺寸的限制问题。该系统可检测出5 mm × 5 mm脱粘缺陷,检测1 500多枚药柱产

品,未发现漏检事故。实物解剖验证可靠性达100%。

#### 4.4 其它方面的应用

激光全息无损检测在压力容器焊缝、复合材料压力容器分层缺陷、电铸结构件的电铸层与基材之间的分层缺陷、玻璃纤维胶接中锥雷达罩、碳纤维喇叭壁纯金镀层、密封橡胶油垫、运载火箭姿态发动机燃烧室、高压管路、印刷电路板焊点虚焊缺陷等的检测都获得了实际应用<sup>[8]</sup>。另外激光全息测量技术在材料力学性能等方面也有了较大应用。如国外20世纪80年代在激光全息光弹应力分析技术方面也逐渐成熟,不仅应用于平面应力应变测量,而且在三维应力、热应力、动负荷应力的测量已有大量报道<sup>[9, 10]</sup>。用激光全息干涉技术测量碳纤维复合板、玻璃钢、有机玻璃板材料的泊松比。结果表明,该方法是一种直接、快捷、可靠的实验方法<sup>[11]</sup>。

#### 5 激光全息无损检测的地位和优势

激光全息干涉计量技术具有灵敏度高、检测速度快、不用探头接触零件表面、不需要耦合剂、对构件的形状和表面状态无特殊要求、能全场直观显示缺陷情况等优点,而且检测结果易于保存。常规的X射线照相法,可用于探测有间隙的缺陷(裂纹、气孔、夹杂)、腐蚀和厚度变化,对紧贴型缺陷无能为力,激光全息采用适当的加载方式,可检测出间隙型和紧贴型缺陷。而且X射线照相法还必须要求X射线与裂纹平行,这样对复杂形状的构件检测困难较大,容易造成漏检。超声波法是一种较成熟的无损检测技术,主要应用于表面的穿透裂纹和表层下缺陷的检测,但需要耦合剂进行接触性检测。对不允许接触溶剂类的产品(固体火药柱)超声波法检测受到限制,而激光全息非接触检测发挥了其优势。声波发射法作为一项常规的检测技术,可用于裂纹的产生和扩散的探测,但它很难区分裂纹产生的信号和噪音信号,而且声波发射法检测具有不可重复性。激光全息检测卸载后,可重新加载进行重复性检测,为准确、可靠地检测提供了条件。其它如渗透法、涡流法、磁性粒子法等NDT技术都存在着对试件及操作者具有严格的要求<sup>[12]</sup>。因此激光全息无损检测方法能解决常规检测手段难以解决的问题,具有不可替代的独特地位。

#### 6 激光全息无损检测的发展趋势

激光全息无损检测由于具有诸多优点而使其得到了迅速发展和广泛应用,但对环境要求十分苛刻,严格的防震性和避光性要求,加载条件也十分严格,同时还具有银盐记录介质在实时全息干涉记录中无法记录瞬态连续变形等问题。

由于激光全息目前存在的问题或不足,故主要应用在军工生产部门,解决一些常规检测方法无法解决而又必须进行无损检测的零部件的检测。为解决防震系统的限制,双脉冲和多脉冲激光全息无损检测的发展和运用使激光全息无损检测从实验室到现场检测迈出了关键的步子<sup>[4, 13]</sup>。银盐干板需暗室避光操作,而且需显影定影烦琐处理,为此光导热塑片记录材料从根本上摆脱了暗室的局限性,实时观察条纹变化,对防震要求也有所降低<sup>[14]</sup>。CCD、光纤技术和计算机数字图像处理技术相结合,形成远距离对检测仪器的控制,摆脱实验室的束缚,将更加促进激光全息无损检测的巨大发展和扩大实际应用范围。另外,单片机控制的激光全息自动化系统,包括干板原位自动控制、CCD摄像头方位调节控制、曝光及产品加载控制、图像采集和处理等,将是未来的主要发展方向。

#### 7 结语

尽管激光全息无损检测技术目前存在一些缺点和不足,但它能解决常规方法难以解决的问题。另外,激光全息无损检测与常规无损检测方法形成了很好的互补性,同时它又有自身的优势,因此,激光全息无损检测是无损检测领域不可缺少的成员,处于重要的地位。

#### 参考文献

- 1 厄尔夫 R K 主编,王致新译.全息摄影无损检测.北京:机械工业出版社,1982:2
- 2 Yu Gongxin. SPIE, ICHOIP, 1996; 2 866:367
- 3 Hung Y Y. Shearography for non-destructive evaluation of composite structure. Optics and Lasers in Engineering, 1996; 24(2/3):161
- 4 王淑岩.高分辨率瞬态全息干涉系统.南昌航空工业学院学报,1996;(增刊):1
- 5 李进业.轮胎激光全息照相的光路布置与全息图像质量的关系.轮胎研究与开发,1992;(1):60
- 6 吴玉喜.应用激光全息无损检测仪检查翻胎质量.翻胎工业技术,1991;11(3):134

(下转第43页)

宇航材料工艺 2003年 第2期

材料的综合力学性能很差。

### 3 结论

(1)在  $1800^{\circ}\text{C} \times 28 \text{ MPa} \times 60 \text{ min}$  热压工艺条件下,  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  相变完全, 全部转变为柱状  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  晶粒, 而且柱状晶直径具有一定的双峰分布特征。

(2)随着烧结助剂含量的增加,  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  晶粒有粗化的趋势, 而适当增加  $\text{La}_2\text{O}_3$  的相对比例, 能增加显微组织的均匀性和致密度, 使晶粒表现出更明显的双峰分布现象。

(3)自韧  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷中晶粒尺寸及分布、长径比的变化对材料的力学性能具有重要影响,  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  晶粒双峰分布特征明显, 长径比适中, 晶粒规整且均匀性较好的材料综合力学性能较高。

### 参考文献

- 1 Lai K R, Tien T Y. Kinetics of  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  grain growth in  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic sintered under high nitrogen pressure. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1993;76:91~96
- 2 Jow Lay H, Li Mei D, Horng Hwa L et al. Role of pore structure in the nitridation of silicon/silicon nitride compacts. *Ceram. Int.*, 1996;22(1):27~31

- 3 Becher P. Microstructural design of toughened ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1991;74(2): 255~269

- 4 Yan D S, Fu X R, Shi S X. Materials and components for engines. In: Proc. 5th inter. symp. on ceram., World Scientific Pub. Co., 1995:29~32

- 5 Emoto H, Mitomo M et al. Control and characterization of abnormally grown grains in silicon nitride ceramics. *J. Euro. Ceram. Soc.*, 1997;173:797~804

- 6 Hwang C J, Susnitzky W, Newman R A et al. Controlled crystallization in self reinforced silicon nitride with  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , SrO, and CaO: crystallization behavior. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1995;78:3 072~3 080

- 7 Becher P F, Sun E Y, Plucknett K P et al. Microstructural design of silicon nitride with improved fracture toughness: effects of grain shape and size. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1998;81(11):2 821~2 830

- 8 罗学涛, 张立同. 含  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O}_3$  添加剂自增韧  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的显微结构和性能. *材料科学与工程*, 1995;13(1):56~58

- 9 罗学涛. 自韧  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的显微结构控制及其性能研究. 西北工业大学博士学位论文, 1996

(编辑 任涛)

(上接第 28 页)

- 7 黎逢春, 田光义, 刘战捷. 复合材料的激光全息无损检测. *航天工艺*, 1993;(4):33

- 8 陈积懋. 航天制造工程手册工艺检测分册. 北京: 航空工业出版社, 1993:15

- 9 Albero C M, Jia Zongliang, Shah Surendra P. Evaluation of damage in brazilian test using holographic interferometry. *ACI Materials Journal (American Concrete Institute)*, 1995;92(3):268

- 10 Yan X, Ohsawa T. Measurement of the internal local stress distribution of composite materials by means of laser imaging methods. *Composites*, 1994;25 (6):443

- 11 朱建堂, 谢东, 陈涛等. 激光全息干涉技术测量泊桑比的方法研究. *无损检测*, 1991;13(4):101

- 12 赵秋艳. 国外先进无损检测技术的发展及应用. *宇航材料工艺*, 1998;28(4):48

- 13 蔡云良, 李季平, 吴启元等. 脉冲激光全息定量无损检测方法研究. *无损检测*, 1999;21(9):388

- 14 邵自强, 芮久后, 董凤云. 光导热塑记录系统在火药包覆质量激光全息无损检测中的应用. *太原机械学院学报*, 1990;11(1):91

(编辑 马晓艳)