

## 激光全息法检测固体药柱包覆层缺陷

王东生<sup>1</sup>, 马兆光<sup>2</sup>, 王维明<sup>2</sup>

- (1. 南京航空航天大学 应用物理系, 江苏 南京 210016;  
2. 北京动力机械研究所, 北京 100074)

**摘要:** 随着航天火箭技术的迅速发展, 如何检测具有较厚(大于 4 mm)包覆层药柱的内部小尺寸(小于 8 mm)缺陷成为一个需要解决的关键问题。基于光干涉原理, 采用激光全息无损检测方法测量了不同包覆层厚度药柱内部小尺寸缺陷的全息图谱, 确定了包覆层厚度以及缺陷尺寸对药柱形变的影响。结果发现当包覆层厚度为 6 mm 时, 能够检测的缺陷临界尺寸为 2 mm。如果缺陷尺寸小于 2 mm, 则无法获得清晰的干涉条纹。同时利用获得的全息图谱计算了 2~6 mm 包覆层药柱缺陷尺寸的实际大小, 误差平均值结果小于 5%。最终结果表明: 用激光全息法检测包覆层厚度大于 4 mm、包覆层脱粘缺陷小于 8 mm 的药柱是一种准确、有效的无损检测手段。

**关键词:** 脱粘缺陷; 药柱; 包覆层; 形变; 激光全息干涉

中图分类号: O438.1; TN249 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)02-0376-05

## Testing of defect for solid grain coating by laser holographic interferometry

Wang Dongsheng<sup>1</sup>, Ma Zhaoguang<sup>2</sup>, Wang Weiming<sup>2</sup>

- (1. Department of Applied Physics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;  
2. Beijing Institute of Power Machinery, Beijing 100074, China)

**Abstract:** With rapid development of space rocket technology, a key problem needs to be solved. How is small size defect (less than 8 mm) in grain with large coating thickness (greater than 4 mm) detected. The holographic maps of solid grains with different thickness were gained by using laser holographic interferometry. The effects of coating thickness and defect size on the deformation of grain were investigated. When coating thickness was fixed at 6 mm, the available detected threshold limit size of defect was about 2 mm. If the sizes of defect were less than 2 mm, distinct interference fringes were not obtained. The actual sizes of defects located between coating with thickness 2-6 mm and grain were calculated by experimental data. Verified by experiment, the average values of the error were less than 5%. Final results indicate that the nondestructive laser holographic interferometry is a kind of valid and accurate method for measuring unbonded defect (less than 8 mm) between coating and grain with coating thickness above 4 mm.

**Key words:** unbonded defect; grain; coating; deformation; laser holographic interferometry

收稿日期: 2012-06-22; 修订日期: 2012-07-19

基金项目: 中国航天科技集团横向合作项目(2010-082-3L)

作者简介: 王东生(1970-), 男, 副教授, 博士, 主要从事薄膜物理方面的研究工作。Email: wdsnju@sina.com

## 0 引言

为了控制推进剂燃烧面积和提高火药利用效率,一般会在固体火箭发动机药柱的外层制作一层由高分子复合材料构成的包覆层<sup>[1]</sup>。设计上要求包覆层与药柱外表面应处于紧密的粘合状态,但是由于制造工艺等原因,药柱与包覆层之间往往会出现部分未沾上区域,即所谓缺陷导致的脱粘区域。由于包覆层在垂直方向上不受约束,当药柱受到外力作用后,在此区域会出现变形、扩展乃至破损,这可能在点火时影响药柱正常燃烧造成串火等事故,严重者甚至会导致火箭发动机发生爆炸,造成发射失败。因此,准确测定脱粘区域缺陷的大小及位置,是判断药柱质量好坏的一个重要手段。

固体火箭发动机作为火工产品,通常使用的检测手段是各种无接触、非损伤的无损检测技术,包括超声、X射线、红外、激光全息技术等<sup>[2-5]</sup>。但是由于包覆层主要采用有机绝缘材料制成,厚度一般在2~4 mm,其隔音效果好,并且与药柱结合紧密,所以常规的超声无损检测方法对包覆层粘接质量检测的效果较差,而X射线方法只适合10 mm以上的脱粘缺陷的测量,对于小尺寸(小于8 mm)脱粘缺陷检测灵敏度则不高。而激光全息具有对形变高灵敏度、测量精度高的特点<sup>[6-10]</sup>,所以到目前为止,激光全息技术仍是药柱包覆层粘接质量最有效的检测方法,也是作为固体火箭发动机包覆层检测被国家军用标准认可的唯一检测方法<sup>[11]</sup>。

文中基于激光全息技术,在真空加载条件下对具有不同包覆层厚度药柱的内部小尺寸(2 mm, 4 mm, 6 mm)缺陷进行了检测,并将包覆层厚度从传统的2~4 mm推广到了6 mm。根据实验数据得到了药柱内部缺陷的尺寸大小,并通过与理论计算得到的结果进行比照,进一步减小了计算误差,为实际判别药柱包覆层小尺寸脱粘缺陷检测结果的正确性提供了科学理论依据。

## 1 激光全息测量原理

激光全息检测技术是基于光的干涉原理,利用激光全息干涉计量术中的二次曝光方法检测药柱包覆层形变。通过形变前后在全息图上出现的干涉特征条纹来确定药柱表面变形的位移场分布,从而确

定缺陷的位置和大小。

在检测包覆药柱的质量时,通常采用真空加载方式,将药柱置于可抽真空的环境里,比如真空箱。通过抽真空至一定压力,使得前后状态保持压差为 $\Delta p$ ,药柱最终出现变形。假设真空加载后,药柱表面有一微小形变量 $\Delta\delta$ ,则根据光学中基本的干涉原理,物体在两次曝光变形前后的相位差满足:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta\delta}{\lambda} (\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 为激光的波长; $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 分别为入射光、反射光与离面位移方向之间的夹角。当公式(1)分别满足条件 $\Delta\varphi=2k\pi$ 和 $\Delta\varphi=(2k+1)\pi$ 时,其中 $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ,在记录介质的相应位置上就会出现明暗相间的干涉条纹,即光程差满足:

$$\Delta\delta = k \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

当记录介质记录到缺陷处的特征条纹相比其他区域数量细而密集时,表明由于较大缺陷的存在产生了较大的形变;反之,则表明缺陷尺寸小,因而产生的形变也比较小。

通过发生畸变的干涉条纹可以判断药柱的包覆层发生了脱粘,如图1所示,其中,图1(a)为无真空负载,图1(b)为加真空负载。

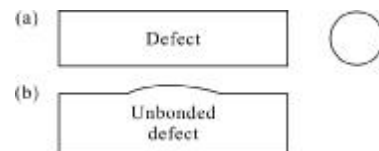


图1 具有内部脱粘区的药柱在真空负压加载下变化

Fig.1 Changed status of grain with unbonded defect under vacuum loading

真空加载后,由于包覆层发生了脱粘在表面产生了缺陷,观察到的干涉条纹一般会发生弯曲或扭曲,如图2所示,其中,图2(a)为缺陷脱粘区,图2(b)为无缺陷区。

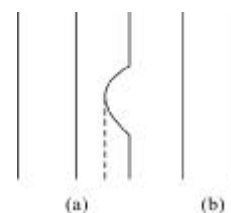


图2 真空负压加载后弯曲的干涉条纹

Fig.2 Curved interference fringes under vacuum loading

根据光学干涉的基本原理,每当光程差的变化为  $\lambda/2$  时,视场中就会有一个条纹的变化。依据条纹弯曲程度可以通过下式判定包覆层脱粘的形变大小:

$$\Delta\delta = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{a}{b} \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为激光器发出的光波长;  $a$  为条纹弯曲后的位移;  $b$  为相邻干涉条纹间距。从公式(3)可以看出,包覆层形变大小的计算最终取决于检测到的干涉条纹弯曲程度和干涉条纹间距之比。

由于一般药柱的直径在 100~400 mm 之间,长度可达 1500 mm,而缺陷尺寸一般仅为几个毫米,所以可以认为脱粘区面积远远小于包覆层的表面积。假设脱粘区为小的圆平面,沿圆平面圆周固支,均匀压力作用在圆平面。根据弹性薄板理论,采用有限元计算模型可以算出圆心处的最大形变为:

$$\Delta\delta = 0.0117 \frac{\Delta p(1-\mu^2)D^4}{Et^3} \quad (4)$$

式中:  $D$  为缺陷直径;  $E$  为包覆层材料的弹性模量;  $t$  为包覆层厚度;  $\Delta p$  为真空加载负压差;  $\mu$  为包覆层材料的泊松比。最后结合公式(3)和(4)即可判定缺陷的位置和大小。

## 2 实验

采用典型的离轴型漫反射的全息照相光路(即物体光波与参考光波不同轴),选择真空负压加载方式检测药柱包覆层缺陷。具体检测光路如图 3 所示,其中 He-Ne 激光器发出的激光波长为 632.8 nm。为了使干涉图像清晰且亮度较高,预先做了压差、温度、物光和参考光的夹角及光强比值对干涉条纹的影响实验,最终实验条件控制如下:调整物光和参考光光程相等( $\sim 4100$  mm),并且它们之间的夹角控制在  $30^\circ \sim 45^\circ$  之间,物光和参考光的光强比值范围在

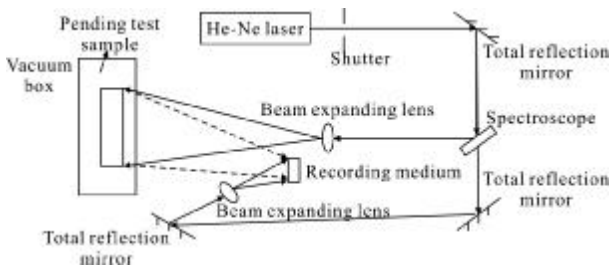


图 3 全息照相光路原理图

Fig.3 Schematic drawing of the holographic interferometric setup

1:3~1:5,负压压强差为 6 kPa。

采用隔层法工艺制作实验所用的样件,人工缺陷的尺寸分别为 2 mm,4 mm 和 6 mm,摆放位置与记录介质(国产专用全息照相玻璃基干板,乳胶为卤化银晶体颗粒)相距 1200~1500 mm。根据 GJB3539-1999 标准的测量工艺要求,实验室内温度一般控制在  $25 \pm 5^\circ\text{C}$ 。最后对干板进行曝光翻拍,获得激光全息图的电子照片。

## 3 分析与讨论

测量了 6 kPa 负压力差加载条件下,药柱发生形变的全息干涉图样。在图 4、图 5 和图 6 中分别给出了具有不同包覆层厚度以及不同脱粘区直径条件下的药柱实物全息照片,从照片中可以看到一系列明暗交替的干涉条纹。可以看出,由于药柱内部不同尺寸缺陷的存在造成了药柱表面的微寸缺陷的存在造成了药柱表面的微小形变,从而导致干涉条纹发生相应不同程度的弯曲,且弯曲程度的大小还和包覆层的厚度有关。在包覆层厚度为 2 mm 的情况下,能够清晰地分辨直径为 2 mm 的脱粘缺陷,并且随着缺陷尺寸的增加,由缺陷引起的图形畸变越来越明显;当包覆层厚度增加到 4 mm 时,观察到了由缺陷引起的同样的图形畸变规律,但是相应的特征条纹的数目在减少;当包覆层厚度增加到 6 mm 时,2 mm 的脱粘缺陷引起的图形畸变已经很小了,这表明在此包覆层厚度情况下,激光全息技术测量的脱粘缺陷直径尺寸临界值为 2 mm,如果脱粘缺陷直径小于 2 mm,干涉条纹畸变不明显,所以缺陷就不容易被检测出来。

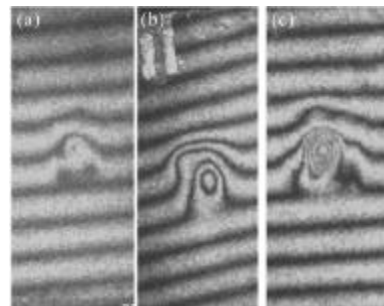


图 4 压力差 6 kPa,包覆层厚度为 2 mm,脱粘区直径分别为 2、4、6 mm 时的激光全息图

Fig.4 Laser holograms of samples with thickness of 2 mm under differential pressure 6 kPa when the diameters of unbonded defects are 2, 4, 6 mm, respectively

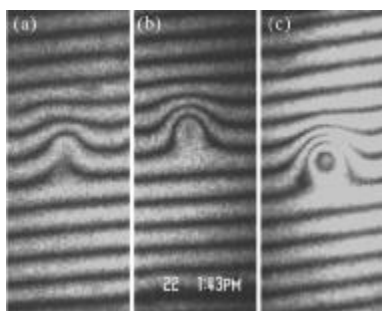


图 5 压力差 6 kPa, 包覆层厚度为 4 mm, 脱粘区直径分别为 2、4、6 mm 时的激光全息图

Fig.5 Laser holograms of samples with thickness of 4 mm under differential pressure 6 kPa when the diameters of unbonded defects are 2, 4, 6 mm, respectively

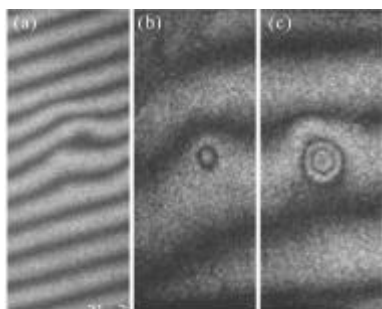


图 6 压力差 6 kPa, 包覆层厚度为 6 mm, 脱粘区直径分别为 2、4、6 mm 时的激光全息图

Fig.6 Laser holograms of samples with thickness of 6 mm under differential pressure 6 kPa when the diameters of unbonded defects are 2, 4, 6 mm, respectively

图 7 和图 8 分别为负压压差  $\Delta p=6 \text{ kPa}$  的情况下, 根据前面的激光全息图计算出来的形变结果, 显示了脱粘区厚度、脱粘区直径与脱粘区最大形变之间的变化关系图。

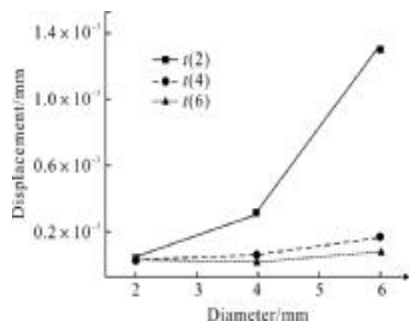


图 7 脱粘区直径与最大形变的关系

Fig.7 Plots of diameter versus maximum displacement for unbonded defect

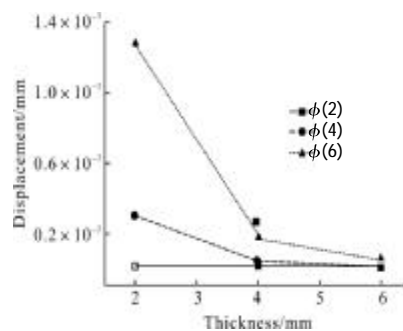


图 8 脱粘区厚度与最大形变的关系

Fig.8 Plots of thickness versus maximum displacement for unbonded defect

从图 7 和图 8 中可以看出, 由缺陷引起形变的数量级约在量级, 其变化有如下规律: (1) 在压差、脱粘区直径不变的情况下, 包覆层脱粘区的最大形变随着其厚度的增加而减小; (2) 在压差、厚度不变的情况下, 包覆层脱粘区的最大形变随着脱粘区直径的增加而几乎成线性增加。上述实验给出的包覆层脱粘区的最大形变的变化规律和数学理论模型的计算结果是一致的。

表 1 是根据公式(4)结合全息图中的数据计算出的药柱内部缺陷直径, 其中  $\phi_t$  和  $\phi_m$  分别为预定值和测量值,  $t$  为包覆层厚度。从表中可以看出, 计算结果和实际缺陷设定尺寸非常接近, 缺陷直径的实测值和预定值之间的最大误差达到 7.5%, 最小误差仅为 2.3%, 误差平均值为 4.98%。

表 1 负压 6 kPa 条件下缺陷直径的预定值和实测值 (单位: mm)

Tab.1 Measurement and setting values of defects under 6 kPa (Unit:mm)

$\phi_m$	2	4	6	$\bar{\phi}$
$\phi_t$	2.15	2.11	1.86	2.04
$t$	4.26	3.91	3.77	3.98
	6.21	6.18	6.22	6.20

关于具体数值的差别, 经分析可能和以下几个因素有关: (1) 数学模型简化了包覆层脱粘区的具体形状, 一般将其简单看成正圆形状, 但是实际上更大的可能是椭圆或者其他几何形状, 从而造成计算误差; (2) 条纹间距、位移的数值测量不够精确, 因为在测量时需要准确判断明纹、暗纹的具体位置, 但是实际测

量得到的条纹存在一个明暗过渡区域,无论是在干板底片还是电子照片,单纯靠肉眼判断定位容易影响测量精度;(3)光路中的元器件的参数调节存在一定误差,如参考光和物光的等光程差调节,由于待测试件具有一定长度且侧面形状为柱形而不是平面,所以物光光程的测量存在一定的误差。

## 4 结 论

在真空加载条件下(负压 6 kPa),针对不同包覆层厚度及不同小尺寸缺陷(小于 8 mm)的药柱展开激光全息图谱的测量,从中得到由于缺陷产生的形变量,进而计算出缺陷的尺寸大小。在包覆层厚度为 6 mm 的条件下,激光全息技术可以测量的脱粘缺陷尺寸临界值约为 2 mm,缺陷直径的实测值和预定值之间的最大误差达到 7.5%,最小误差仅为 2.3%,误差平均值为 4.98%。以上结果说明激光全息手段完全可以检测包覆层厚度达 6 mm 的药柱中存在的小于 8 mm 的脱粘缺陷。

### 参考文献:

- [1] Himanshu S. Burn-back equations for high volumetric loading single-grain dual-thrust rocket propellant configuration [J]. Defence Science Journal (SI), 2011, 61(2): 165-170.
- [2] Guo Hongtao, Cao Fuqi. Ultrasonic testing of the interface bonding quality of solid rocket motor charge [J]. Aero Weaponry, 2006, (6): 49-52. (in Chinese)  
郭洪涛,曹付齐. 固体火箭发动机装药界面胶接质量超声波检测[J]. 航空兵器, 2006, (6): 49-52.
- [3] Hou Genxiang. The stability of one-dimensional stationary flows of compressible viscous fluids [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 1995, (2): 35-36. (in Chinese)  
侯根祥. 射线检测推进剂药柱内部质量的条件控制[J]. 火炸药学报, 1995, (2): 35-36.
- [4] Jiang Shufang, Guo Xingwang, Shen Jingling, et al. Infrared thermal wave NDT on the disbands of the heat insulated layer in solid propellant rocket motors [J]. Laser & Infrared, 2005, 35(8): 584-586. (in Chinese)  
蒋淑芳,郭兴旺,沈京玲,等. 固体火箭发动机绝热层脱粘的红外热波无损检测[J]. 激光与红外, 2005, 35(8): 584-586.
- [5] Wu Wenjun, Qu Jun, Zhou Hao. Laser shearography testing for interface debond between grain and liner [J]. Nondestructive Testing, 2010, 32(5): 373-375. (in Chinese)  
吴文军,瞿军,周昊. 固体药柱包覆层脱粘的激光错位散斑检测[J]. 无损检测, 2010, 32(5): 373-375.
- [6] Hernandez-Montes M S, Santoyo F M, López C P, et al. Digital holographic interferometry applied to the study of tympanic membrane displacements [J]. Optics and Lasers in Engineering (SI), 2011, 49(6): 698-702.
- [7] Berg M J, Videen G. Digital holographic imaging of aerosol particles in flight [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer (SI), 2011, 112(11): 1776-1783.
- [8] Habib K. Measurement of surface resistivity and surface conductivity of anodised aluminium by optical interferometry techniques [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44 (2): 318-321.
- [9] Mortia T, Sakawa Y, Kuramitsu Y, et al. Temperature measurements of electrostatic shocks in laser-produced counter-streaming plasmas [J]. Astrophysics and Space Science, 2011, 336(1): 283-286.
- [10] Gao Benli, Gu Jihua, Zhou Hao, et al. Pre-magnified off-axis Fresnel digital holographic microscopy [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4): 706-710. (in Chinese)  
高本利,顾济华,周皓,等. 预放大离轴菲涅耳数字全息显微技术[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 706-710.
- [11] National Standardization Technical Committee. GJB 3595-91 Laser Holographic nondestructive testing method of adhesive quality for solid grain coating [S]. Beijing: China Standard Press, 2006: 2668-2673. (in Chinese)  
国家技术标准委员会. GJB 3595-91 药柱包覆层粘接质量激光全息无损检测方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 2668-2673.