

激光全息检测技术研究与应用

王永红, 闫明巍, 刘国增, 张 腾

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 介绍了激光全息检测技术的原理、特点和方法。通过研究激光全息检测位移量与激光全息检测载荷理论并结合检测试验给出了激光全息检测工艺流程、工艺方法和工艺规范。采用该规范对某型液体火箭发动机推力室收扩段铣槽夹层结构钎焊缝进行了无损检测, 检测通过的液体火箭发动机推力室已经完成了飞行任务考核。

关键词: 无损检测; 铣槽夹层结构; 钎焊缝; 激光全息

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 04-0074-05

Research and application of laser holography detection technology

WANG Yonghong, YAN Mingwei, LIU Guozeng, ZHANG Teng

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: The principle, characteristic and method of laser holography detection technology are introduced in this paper. The technological process, method and specifications of laser holography detection are given based on the study of the displacement and loading theory of laser holography detection as well as in combination with the result of detection test. Brazing seams of grooved sandwich structure at the convergent-divergent section of thrust chamber in liquid rocket engine were detected with nondestructive detection method. The liquid rocket engine verified by the detection method has completed its flight qualification.

Keywords: nondestructive detection; grooved sandwich structure; brazing seam; laser holography

0 引言

无损检测 (non-destructive testing, 简称 NDT) 技术, 是以不损伤被检对象结构完整性和使用性能, 利用一定的物理原理, 检测被检对象表面和内部的不连续性, 借以评价被检对象质量等级和

安全程度的一种检测技术和方法, 广泛应用于航空、航天、兵器、船舶、核能、电力、冶金、铁道、石油化工、汽车工程、桥梁工程等领域。激光全息检测技术作为一种非接触光学无损检测方法, 具有检测速度快、检测结果显示直观等特点, 可以解决低密度材料粘接、薄层结构粘接的

收稿日期: 2016-05-25; 修回日期: 2016-06-08

基金项目: 中国航天科技集团公司重大工艺专项资助项目(ZDGY2010-20)

作者简介: 王永红 (1967—), 男, 研究员, 研究领域为无损检测技术

缺陷检测问题。在飞机金属蜂窝胶接结构、碳纤维复合材料结构、固体火箭发动机火药柱包覆层粘接结构、轮胎胶接质量、航天器复合材料高压容器、涡轮叶片、美国航天飞机主发动机镍-铜电铸推力室的无损检测中均得到了广泛应用。在导弹武器系统用液体火箭发动机生产制造过程中, 采用激光全息检测技术对推力室收扩段钎焊结构进行了无损检测, 检测通过的液体火箭发动机推力室已经完成了飞行任务考核。

1 液体火箭发动机推力室收扩段钎焊结构与检测要求

液体火箭发动机是将推进剂的化学能转化为气流动能的装置。推进剂在推力室雾化、混合和燃烧, 使推力室处于高温、高压工作状态, 燃烧室内壁的热流密度较大。为降低内壁工作温度, 减少烧蚀等情况的发生, 推力室身部均为波纹板、铣槽式夹层通道结构, 采用钎焊、扩散焊接工艺将推力室内、外壁连接为一体。某型液体火箭发动机推力室收扩段铣槽夹层通道结构示意图见图 1。发动机推力室收扩段材料为不锈钢 1Cr18Ni9Ti (内壁) -1Cr21Ni5Ti (外壁), 钎焊成型的推力室收扩段在进行液压强度试验时, 钎焊焊缝处不允许有鼓包、开裂等现象。

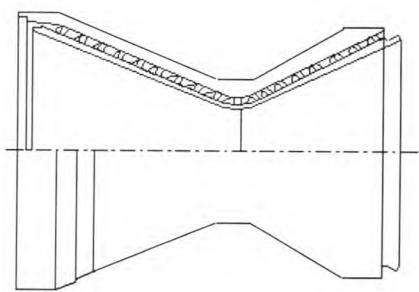


图 1 某型液体火箭发动机推力室收扩段结构示意图

Fig. 1 Structure diagram for convergent-divergent section of thrust chamber in a liquid rocket engine

2 激光全息检测原理

2.1 位移量计算

激光全息照相检测是激光检测技术的一种。

它是采用激光对被检测物体分别在加载前后进行照射, 通过记录物体加载前后由于形变导致干涉条纹的变化情况来检测物体内部结构、质量信息的一种非接触无损检测技术。激光全息检测是激光全息与干涉计量检测技术相结合的产物和检测技术, 其基本检测原理是: 在外力作用下, 物体的表面会发生变形, 若物体内部存在缺陷, 则缺陷部位对应的表面与正常部位对应的表面变形是不同的, 应用全息干涉计量检测方法, 把不同表面的变形转换为光强表示的干涉条纹, 并由感光介质记录下来; 如果不存在缺陷, 则干涉条纹只与外加载荷有关, 而且是有规律的, 每一条条纹都表示结构变形的等位移线; 如果存在缺陷, 则会产生畸变的干涉条纹, 根据这种畸变的干涉条纹则可以判断出物体内部结构的缺陷、缺陷大小和缺陷所处的位置。

当激光全息图再现时, 所产生的干涉条纹指示了两次曝光期间物体的位移量, 两条相邻干涉条纹所代表的位移量的差值即为再现光波波长的二分之一。

根据光学原理, 当两光波发生干涉时, 干涉条纹数 N 与光程差 Δl 和光波波长 λ 之间的关系为

$$\Delta l = N\lambda \quad (1)$$

当 N 为 $\lambda/2$ 的偶数倍时, 则得到亮条纹; 当 N 为 $\lambda/2$ 的奇数倍时, 则得到暗条纹。

在物体受到应力作用后, 表面产生位移。当光线照射方向垂直于物体表面, 在垂直方向观察时, 则位移量为

亮条纹

$$z = n\lambda/2 \quad (2)$$

暗条纹

$$z = (2n+1)\lambda/4 \quad (3)$$

式中: z 为位移量; μm ; n 为自然数, 1, 2, 3, ...。

当光线照射方向与物体法线夹角为 α , 观察角为 β 时, 则位移量为

亮条纹

$$z=n\lambda/(\cos\alpha+\cos\beta) \quad (4)$$

暗条纹

$$z = (2n+1)\lambda / [2(\cos\alpha + \cos\beta)] \quad (5)$$

根据公式 (2) ~ 公式 (5), 激光器为氦-氖激光器, 则 $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$, $\lambda/2=0.3164 \mu\text{m}$, 此时, 物体的变形量均可在激光全息图上显现出来。

2.2 激光全息检测载荷

由激光全息检测原理可知,要获得激光全息干涉信息,必须给被检测对象施加一定的但对被检测对象不构成任何破坏的载荷或者扰动。本文施加的载荷为高纯氮气 (N_2), 氮气压力计算公式见公式 (6)。

根据公式 (2) ~ 公式 (5), 满足全息检测条件时, 被检测对象的变形量在 $\varepsilon=0.3164$ 范围之内, 对钎焊和扩散焊接焊缝上的每一处缺陷来讲, 理想情况下, 可将铣槽筋视为四周固定的圆盘模型, 按照周边紧固的圆盘模型中心挠度计算公式, 可得出激光全息检测载荷 (加载量) 即氮气压力计算公式为

$$\Delta p \approx \frac{3(1-\mu^2)R^4\delta}{16Eh^3} \quad (6)$$

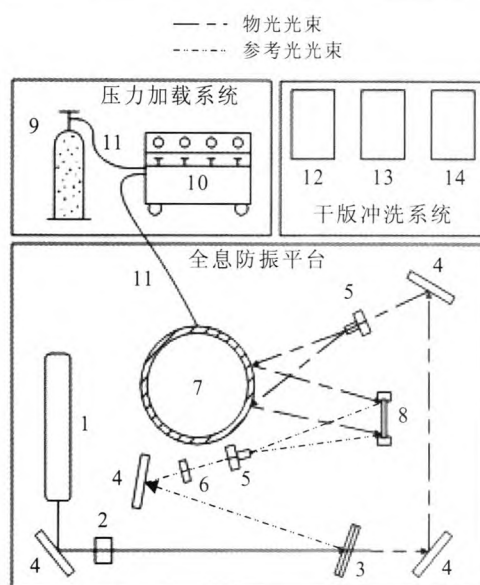
式中： δ 为挠曲量，即缺陷中心位移量， μm ； μ 为材料的泊松比； E 为材料的弹性模量； R 为缺陷半径， μm ； h 为缺陷埋藏深度， μm ； Δp 为两次加载的压力差，即氮气压力， MPa 。

根据公式 (6) 计算结果, 结合工程经验和试验数据, 激光全息检测时, 施加在被检测对象上的载荷-高纯氮气压力一般在 0~6 MPa 之间。

3 激光全息检测工艺

激光全息检测工艺流程为:

被检对象外表面涂覆白色碳酸钙粉,以增强激光漫反射强度;检测光路设计与布置;干版装夹;第一次曝光;被检对象载荷加载,即给被检对象加载 0~6 MPa 高纯氮气 (N_2);第二次曝光;干版冲洗处理;全息图像评判。激光全息检测系统原理示意简图见图 2。



1-光源; 2-电子快门; 3-分光镜; 4-反射镜;

5-扩束镜; 6-衰减镜; 7-被检试件; 8-全息干版及其支

架; 9-气源; 10-压力加载装置; 11-压力管路;

12-显影液槽；13-清水槽；14-定影液槽

图2 激光全息检测系统原理示意简图

Fig. 2 Principle diagram of laser holographic detecting system

激光全息检测工艺流程框图见图 3。光路设计和布置应使物光和参考光在被检对象任何被检部位处的光程差小于激光器的相干长度,物光和参考光夹角在一定范围内,全息干版的法线平分该夹角;同时,光路设计还应考虑物光的单次覆盖区域,以提高检测效率。被检对象加载压力小时,无法产生激光干涉所需要的变形量;加载压力大时,则干涉条纹密集,全息图难以观察,载荷超过一定值后,甚至无法产生全息干涉;被检对象加载载荷在公式(6)计算结果的基础之上,结合工程经验和检测试验结果进行确定。本文对钎焊缺陷试验件进行全息检测试验所加载的高纯氮气(N_2)载荷压力为 0~6 MPa,检测某型液体火箭发动机推力室收扩段钎焊缝所用载荷压力为 3 MPa。

激光全息检测系统使用的激光器是 He-Ne 气体激光器, 激光器波长 $\lambda=0.6328\text{ }\mu\text{m}$, 激光器功率 $P=50\text{ mW}$; 加载系统是 MN701-7 型加载试验台, 加载介质是高纯氮; 试验平台是铸铁平台;

减振系统是多级混合气动减振系统。光学元件有：扩束镜、分光镜、反射镜、衰减镜、光学快门等；记录介质是三环 GS-I 型全息干版。激光全息检测工艺规范为：物光光程 $l_1=1\,800\text{ mm}$ ，参考光光程 $l_2=1\,802\text{ mm}$ ，物光与参考光夹角 $\alpha=30^\circ$ ，物光与参考光光强比 $\eta=1:3$ ，缺陷试样件 N_2 加载压力 $p_1=0\sim6\text{ MPa}$ ，某型液体火箭发动机推力室收扩段 N_2 加载压力 $p_2=3\text{ MPa}$ 。曝光时间，第一次曝光时间 $t_1=6\text{ s}$ ，第二次曝光时间 $t_2=6\text{ s}$ 。

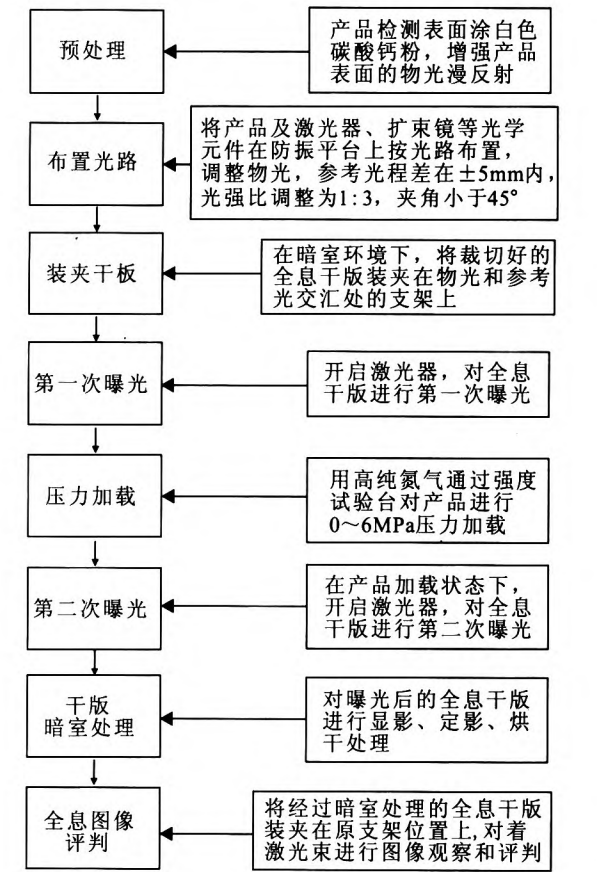


图 3 激光全息检测工艺流程框图
Fig. 3 Process flow diagram of laser holography detection

4 激光全息检测结果与分析

制作缺陷试验件。编号为 1# 和 2#，缺陷试验件材料均为不锈钢 1Cr18Ni9Ti（内壁）-1Cr21Ni5Ti（外壁），与发动机推力室收扩段材料 1Cr18Ni9Ti（内壁）-1Cr21Ni5Ti（外壁）一致，缺陷试验件内均预置（4，5，6，8，10，12）

×1.2 mm 未焊上缺陷。1# 缺陷试验件为平板型结构，其结构示意简图见图 4；2# 缺陷试验件为筒型结构，其结构示意简图见图 5。按照图 2 所示的激光全息检测系统搭建缺陷试验件的激光全息检测系统，缺陷试验件加载负荷为高纯氮气，压力 0~6 MPa。根据图 3 所示激光全息检测工艺流程，分别对 1# 和 2# 缺陷试验件进行激光全息检测，检测结果见表 1。

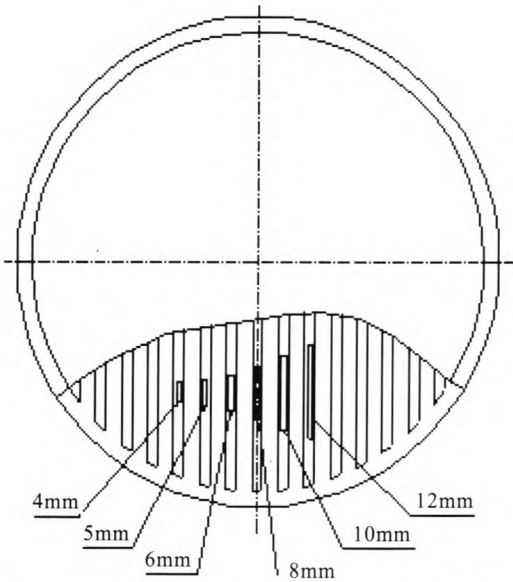


图 4 1# 平板型缺陷试验件结构与缺陷位置示意简图
Fig. 4 Structure and defect positions of 1# plate structural test unit with defects

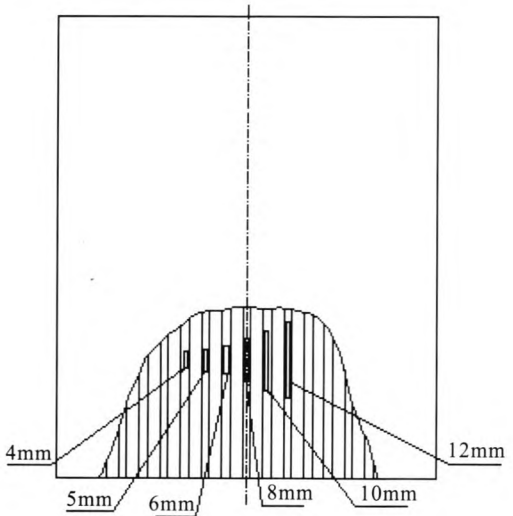


图 5 2# 筒型缺陷试验件结构与缺陷位置示意简图
Fig. 5 Structure and defect positions of 2# cylinder test unit with defects

表 1 缺陷试验件激光全息检测结果

Tab. 1 Results of laser holography detection for specimens with defects			
缺陷试件编号	缺陷长度/mm	N ₂ 压力载荷/MPa	全息检测结果
1# 2#	4	1	干涉条纹稀疏, 边缘部位检测效果差
		2	有干涉条纹, 可检测
		3	有干涉条纹, 检测效果最好
		4	有干涉条纹, 检测效果最好
		5	干涉条纹密集, 难以观察
		6	变形量大、无干涉条纹, 无法检测
	5	1	干涉条纹稀疏, 可检测
		2	有干涉条纹, 检测效果好
		3	有干涉条纹, 检测效果最好
		4	有干涉条纹, 检测效果好
		5	干涉条纹密集, 难以观察
		6	变形量大、无干涉条纹, 无法检测
	6	2	有干涉条纹, 检测效果好
		3	有干涉条纹, 检测效果最好
		4	有干涉条纹, 检测效果好
	8	3~4	有干涉条纹, 检测效果最好
	10	3~4	有干涉条纹, 检测效果最好
	12	3~4	有干涉条纹, 检测效果最好

由表 1 可知, 采用激光全息检测技术, 可以在较低载荷下检测出最小 4 mm 长的未焊上缺陷, 激光全息检测的压力载荷可在 1~5 MPa 内选择。当载荷为 1 MPa 时, 对于长度小于 4 mm 的未焊上缺陷, 全息图像的分辨率低, 边缘部位检测效果差; 当载荷大于等于 5 MPa 时, 全息干涉条纹密集, 观察、检测效果差, 甚至由于变形量大而不能形成干涉条纹, 无法检测。由此可见, 最佳的压力载荷在 3 MPa 左右。采用激光全息检测工艺, 对某型液体火箭发动机推力室收扩段进行了检测, 检测结果表明: 在 3 MPa 载荷下, 经激光全息检测该发动机推力室收扩段未发现钎焊缺陷, 在后续的 14 MPa 液压强度试验过程中, 该发动机推力室收扩段钎焊缝部位未发生变形、鼓包、撕裂等现象, 检测通过的液体火箭发动机推力室已经完成了飞行任务考核。由此表明: 激光全息检测技术可满足设计文件对发动机推力室收

扩段钎焊缝质量检测的技术要求。

5 结论

本文研究了激光全息检测原理、激光全息检测位移量和被检对象加载载荷计算方法, 给出了激光全息检测工艺流程、工艺检测方法、检测规范, 即物光光程 $I_1=1\ 800\text{ mm}$, 参考光光程 $I_2=1\ 802\text{ mm}$, 物光与参考光夹角 $\alpha=30^\circ$, 物光与参考光光强比 $\eta=1:3$, 缺陷试样件 N₂ 加载压力 $p_1=0\sim6\text{ MPa}$ 。采用该激光全息检测规范检测的某型液体火箭发动机推力室收扩段铣槽夹层结构钎焊缝未发现焊接缺陷, 焊接质量满足设计技术要求。

该发动机推力室在 14 MPa 液压强度试验过程中, 推力室收扩段钎焊缝部位未发生变形、鼓包、撕裂等现象, 激光全息检测通过的液体火箭发动机推力室已经完成了飞行任务考核。

(下转第 96 页)

5 结论

研究了自锁阀激光焊接理论, 焦点位置 (即实焦、离焦和入焦三种聚焦方式) 与焊缝熔深之间的关系, 焊接速度和激光功率与焊缝熔深之间的关系, 在此基础上研究了随着激光功率增加, 不同焦点位置的焊接过程依次经历稳定热导焊, 热导焊、深熔焊交替进行的不稳定焊接和稳定深熔焊接三种模式, 进而研究了稳定焊接模式下工艺参数与焊缝熔深之间的关系, 由此得出了自锁阀在稳定焊接模式下的最佳焊接工艺规范参数, 采用该激光焊接工艺规范焊接的常压和高压自锁阀焊缝外观质量、气密、液压以及焊缝氦质谱检漏试验结果全部满足设计要求。常压和高压自锁阀已经应用于嫦娥五号、探月工程、东风导弹武器系统、货运飞船、921-3 推进分系统、东方红三号等推进系统的液体火箭发动机之中。

参考文献:

- [1] 北京北冶功能材料有限公司. Cr17NiTi 抗蚀软磁合金热锻棒材技术协议: BYG06JX353-2015[S]. 北京: 北京北冶功能材料有限公司, 2015: 3.
- [2] 陈彦宾. 现代激光焊接技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] 陈武柱. 激光焊接及切割质量控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [4] 吴毅雄, 殷树言. 焊选手册: 材料的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [5] 刘泽敏, 宋凡. 激光焊工艺参数对焊缝熔深及质量的影响[R]. 上海: 上海空间推进研究所工艺研究室工艺技术总结报告, 2014.
- [6] 秦国梁, 林尚扬. 激光焊接体能量及其对激光深熔焊缝熔深的影响[J]. 焊接学报, 2006(27): 74-76.
- [7] 徐国建, 王虹. 工艺参数对不锈钢薄板激光叠焊成形性能的影响[J]. 电焊报, 2010, 40(11): 11-14.
- [8] 卢飞, 何建萍. 不锈钢焊缝组织细化的研究现状[J]. 焊接技术, 2014, 43(11): 27-31.

(编辑: 王建喜)

(上接第 78 页)

参考文献:

- [1] 李家伟. 无损检测手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [2] 刘贵民. 无损检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [3] 黄立德. 液体火箭发动机原理 [M]. 北京: 宇航出版社, 1991.
- [4] 《美国无损检测手册》译审委员会. 美国无损检测手册 [M]. 上海: 上海世界图书出版公司, 1999.
- [5] 余拱信. 激光全息技术及其工业应用[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.

- [6] 邱元武. 激光技术和应用 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [7] 厄尔夫 R K. 全息摄影无损检测[M]. 王致新 译. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [8] 王任达. 全息和散斑检测 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [9] 魏超. 液体火箭发动机焊接技术[M]. 北京: 宇航出版社, 2016.
- [10] 王仲生. 无损检测诊断和现场实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.

(编辑: 王建喜)