

# 错位散斑技术在钛合金 SPF/DB 结构检测中的应用初探<sup>\*</sup>

## Research on Application of Shearography in SPF/DB Structure of Titanium Alloy

航天特种材料及工艺技术研究所 赵林博 雷 鹏 宋 鹏 许 沂 刘新芹

**[摘要]** 分析了钛合金 SPF/DB 结构缺陷及形成原因,介绍了错位散斑技术的基本原理,通过采用错位散斑技术对钛合金 SPF/DB 结构进行检测试验,能够发现明显的缺陷特征,从检测敏感度、效率等方面与 X 射线、超声 C 进行对比,结果表明,错位散斑技术能够应用于钛合金 SPF/DB 的结构检测,但仍需在检测精度、可靠性等方面进行深入研究。

**关键词:** 错位散斑 SPD/DB 钛合金 无损检测

**[ABSTRACT]** The defect and reason in superplastic forming and diffusion bonding on titanium alloy are analyzed. The basic principle of shearography is introduced. By using the shearography on SPF/DB of titanium alloy, some obvious characteristics of the defect are obtained. Shearography technique is compared with X-ray and ultrasonic on sensitivity, reliability, and so on. Shearography is proved to be an effective technique on SPF/DB of titanium alloy, but the precision and reliability of the technique should be studied deeply in the future.

**Keywords:** Shearography SPF/DB Titanium alloy NDT

由于钛合金超塑成形/扩散连接(SPF/DB)结构具有比强度高、比性能好、耐热等优点,同时能够成形出形状复杂的强化结构件、整体零件,在减轻飞行器重量、降低生产成本方面显示了极大的优越性,在航空航天工业得到高度重视<sup>[1]</sup>。20世纪70年代以来,各国对SPF/DB投入大量的人力和财力开展试验研究,使该工艺迅速投入生产,获得了巨大的经济效益<sup>[2]</sup>。由于工艺上种种原因,靠控制工艺规程很难保证SPF/DB构件在制造工艺过程中不产生缺陷,一旦未能确保工艺参数,或者是表面被污染等,就有可能产生扩散连接缺陷。因此,对扩散连接界面质量的无损检测越来越受到关注<sup>[3]</sup>。

目前,国内外用于SPF/DB构件无损检测的方法主

要有:超声检测、射线检测、涡流检测等<sup>[4-7]</sup>,激光全息属于目前比较新的无损检测方法,而激光错位散斑干涉(Shearography,又称激光剪切全息)又是在激光全息技术的基础上,运用光学、计算机、数字图像处理等现代发展起来的新型无损检测技术,已在蜂窝结构、压力容器、汽车轮胎等检测方面获得了广泛的应用<sup>[8-12]</sup>,但是,该方法在钛合金SPF/DB结构方面的检测还未曾看到相关的试验和研究报道。

错位散斑无损检测常用来检测复合材料、集成电路、压力容器和焊接工件表面及内部缺陷,成为X射线、超声、红外等传统无损检测方法的一种有效补偿手段。

### 1 SPF/DB 缺陷及其形成原因

扩散焊接是利用金属在真空或保护气体中,在一定的温度和压力下保持一段时间,通过接触面之间的原子相互扩散完成焊接的一种固相焊接方法。SPF/DB结构中,可能产生的典型缺陷按缺陷的间隙可分为两类:位于连接界面的宏观间隙型层状缺陷(见图1)和位于连接区的微观紧贴型缺陷<sup>[13]</sup>。产生这两类缺陷的主要原因是:(1)扩散连接表面不清洁或被污染;(2)未能严格控制确保规定的压力、温度、时间等工艺参数<sup>[14]</sup>。

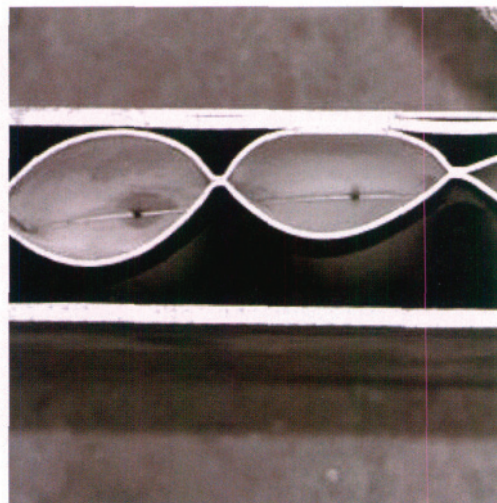


图1 宏观缺陷

Fig.1 Example of the macro-blemish defect

<sup>\*</sup> 航天三院创新基金项目(20H1103)资助。

## 2 错位散斑干涉的基本原理及加载方法

错位散斑干涉的基本原理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<sup>[15]</sup>。

错位散斑技术是通过寻找反映应变集中的特征条纹来识别缺陷,缺陷的尺寸和位置可直接由相应的特征条纹的尺寸和位置确定。虽然错位散斑测量的是表面应变,但由于内部缺陷同样也影响表面变形,所以无论是在表面还是内部缺陷理论上都能被检测到<sup>[16]</sup>。

检测时当待测物有缺陷时,通过加载即受到外力作用,内部或近表面缺陷会反映到表面变形中,表面形变出现异常,在干涉条纹中会有所反映,缺陷从而被检出。

常用的加载方式有热加载和真空加载。热加载常用的热源为电吹风、红外灯或卤素灯等<sup>[17]</sup>。热加载方式设备简单,使用方便,载荷变化范围可大可小,但是该加载方式受缺陷深度影响较大。真空加载一般有两种方式:一是将待测物置于真空箱中,这种方式效果最理想,但受限于待测物的大小和是否可拆卸;另一种是使用真空罩,将真空罩吸附于待测物上,但这种加载方式对待测物不同部分的加载不均匀,效果不如真空箱。两种真空加载方式都需要真空泵产生真空源的装置。

## 3 在钛合金 SPF/DB 结构中的检测试验

本次试验所采用的检测设备是 LTI-5100HD 激光散斑检测仪,被检测试验件为钛合金 SPF/DB 四层结构(见图 2),蒙皮和芯层结构材料均为 BT20。

试验前,首先对该测试件采用 X 射线检测,对其内部结构进行检测,如图 3 所示,图中已标出局部未完全扩散的缺陷。

试验时,先将被检测试件固定在检测试验台上,然后调整光路,让经过扩散的激光均匀地照射于待检测区域,调整镜头的光圈,观察计算机上的实时显示影像,使灰度图像亮度适中,图像清晰。调整好各系统后,用热吹风加热待检测试件,持续 0.5min 即可,让其自然冷却。然后启动软件系统,在被检测试件冷却过程中,实时地保存检测结果图像。由图 4、图 5 中所显示出来的不均匀条纹,即显示在该区域有缺陷。其他无损检测技术如超声 C 扫描的

检测结果如图 6 所示。

超声技术是普遍采用的无损检测方法,它既可以检测材料或构件的表面缺陷,又可以检测内部缺陷,尤其是对裂纹、叠层和分层等平面状缺陷,具有很强的检出能力。但是超声 C 扫描需要对工件逐点检查,并且在

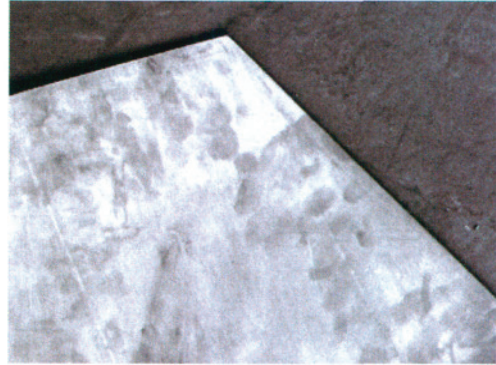


图2 四层结构件

Fig.2 Example of the honeycomb structure

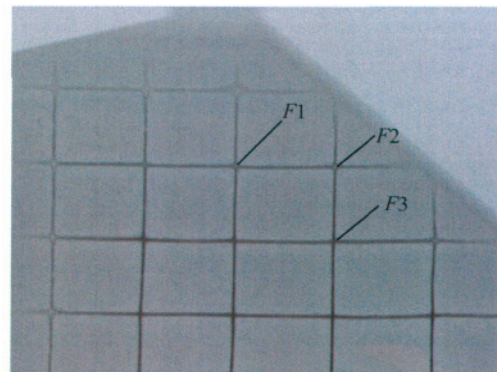
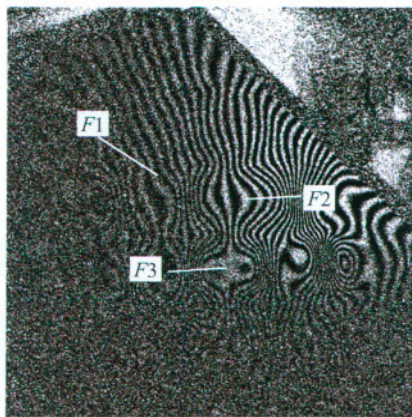
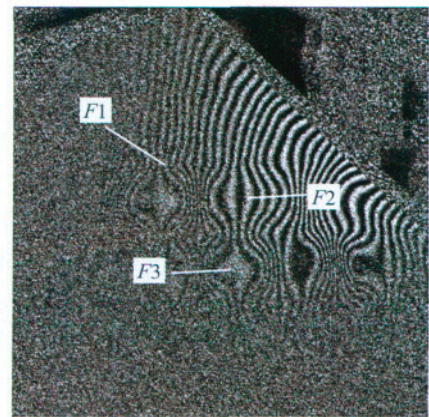


图3 X射线检测结果

Fig.3 X-ray image



(a) 检测图像一



(b) 检测图像二

图4 检测结果

Fig.4 Inspection results



图5 检测局部放大

Fig.5 Partial magnified inspection image

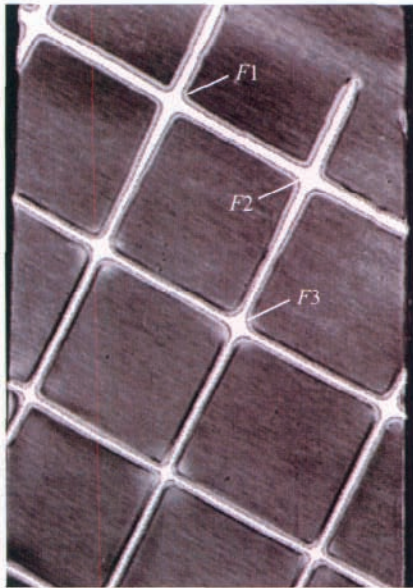


图6 超声C扫描结果

Fig.6 Ultrasonic C-scan image

工件与换能器之间需要加耦合剂,这使超声检测速度太慢,而错位散斑是全场非接触、无需耦合剂的检测方法,一旦对试件施加应力,缺陷即被检出,同时其还具有检测速度快、灵敏度高、适应对象广、直观感强及可用于现场等突出优点<sup>[18]</sup>。

#### 4 结论

错位散斑技术是在激光、视频、数字图像处理等现代高科技成果的基础上发展起来的新型无损检测技术,与常规无损检测方法形成了很好的互补性。针对钛合金 SPF/DB 构件缺陷的无损检测,用错位散斑检测方法

进行检测,可非常直观地看出试验件存在缺陷。

(1) 由于钛合金 SPF/DB 结构件实际内部缺陷是隐蔽的,具体情况复杂,散斑干涉技术及相应的加载对近表面的缺陷检测是可行的,而对于在结构内部的缺陷的检测还需要进一步的试验研究。

(2) 进一步探索该方法在钛合金 SPF/DB 构件缺陷检测的优势,提高数据处理和分析技能,使缺陷条纹更清楚,更易判读,在不降低检测速度的前提下,提高检测灵敏度,为钛合金 SPF/DB 多层结构的工程化应用提供良好的质量保证。

#### 参考文献

- [1] 邱惠中. 扩散焊接及其在航空航天领域的应用. 宇航材料工艺, 1997 (4): 27-32.
- [2] 文九巴. 超塑性应用技术. 北京: 机械工业出版社, 2005. 231-233.
- [3] 刚铁, 李伟力. 扩散焊接头质量检测的研究现状. 焊接, 2000 (5): 6-11.
- [4] 常士基, 丁克美. 民用航空器无损检测技术的发展和现状. 无损检测, 2008, 30 (4): 201-207.
- [5] 刘松平, 郭恩明. 钛合金扩散焊中紧贴型缺陷的超声波检测. 无损检测, 2004, 26 (2): 62-65.
- [6] 黎连修. 超声检测技术在中国. 无损检测, 2008, 30 (4): 197-200.
- [7] 郑世才. 我国射线检测技术今年的发展. 无损检测, 2004, 26 (4): 163-167.
- [8] 戴蓉. 激光技术在无损检测领域的应用与发展. 激光与光电子学进展, 2000 (6): 1-4.
- [9] 曾启林, 李文渊, 熊显名. 激光全息轮胎无损检测仪简介. 橡塑技术与装备, 2004, 30 (4): 43-47.
- [10] 李德昌, 张早校, 郁永章. 应用激光全息照相相对压力容器无损探伤的试验研究. 西安交通大学学报, 1998, 32 (1): 107-110.
- [11] 朱晨, 张志津, 徐舟. 用激光全息技术进行飞机发动机活塞杆疲劳检测. 光电子·激光, 2002, 13 (1): 62-64.
- [12] 陈桂才, 吴东流, 井立. 激光全息无损检测的现状 & 展望. 宇航材料工艺, 2003 (2): 26-28, 43.
- [13] 刘松平. 钛合金扩散焊接中紧贴型缺陷的超声波检测. 无损检测, 2004, 26 (2): 62-65.
- [14] 刘松平, 郭恩明, 宋秀荣. 钛合金 SPF/DB 薄板构件高频超声检测. 航空制造技术, 1993 (1): 33-34.
- [15] 李国华, 吴森. 现代无损检测与评价. 北京: 化学工业出版社, 2008. 252-268.
- [16] 田代才. 电子错位照相技术及其在材料无损检测中的应用. 上海金属, 2006, 28 (2): 53-56.
- [17] Udupa G, Wang J, Ngoi B K A A Combined fiber optic digital shearography and holography system for defect inspection in Si-wafers// Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. San Diego, CA, USA: SPIE, 2005: 414-420.
- [18] 张于北, 王铮. 错位散斑检测复合材料模拟缺陷试验. 航空制造技术, 2009 (增刊): 115-117.

(责编 小城)