

涡流 C 扫描在钛合金 SPF/DB 结构检测中的实验研究 *

Investigation of Eddy Current C-Scan in Testing of Titanium Alloy SPF/DB Structure

航天特种材料及工艺技术研究所 宋 鹏 雷 鹏 许 沂 刘新芹
中北大学机电工程学院 赵林博

[摘要] 为了探索 SPF/DB 结构检测中有效的检测方法,应用涡流 C 扫描对钛合金 SPF/DB 结构进行了检测实验,将涡流 C 扫描结果和 SPF/DB 结构检测中常用的超声 C 扫描结果进行了对比分析。结果表明,涡流 C 扫描能够检测出 SPF/DB 结构的界面宏观缺欠以及一定尺度以上的界面微观缺欠,在 SPF/DB 结构检测中是可行的。有必要对该检测方法的有效性和检测结果的可靠性进行深入研究。

关键词: 涡流 C 扫描 钛合金 SPF/DB 结构 无损检测

[ABSTRACT] Eddy current C-scan testing experiment is carried out to investigate the effective testing method in testing of SPF/DB structures. Compared with the results of ultrasonic C-scan, the results of eddy current C-scan are analyzed. It is shown that eddy current C-scan can inspect the imperfections like macroscopic interface imperfection and microcosmic interface imperfection with a certain scale. Eddy current C-scan is a feasible testing method for SPF/DB structures. It is necessary that availability and reliability of eddy current C-scan for SPF/DB structures are studied more deeply.

Keywords: Eddy current C-scan Titanium alloy SPF/DB structure NDT

航空、航天领域对新一代飞行器结构材料的密度和高温性能提出了更高的要求。一些轻质耐高温的新型钛合金,如 TA15、Ti55、BTi6431S 等,因其优异的高温性能成为新一代飞行器主选的结构材料。钛合金具有优良的高温超塑成形性能和扩散连接性能,能够通过超塑成形/扩散连接组合工艺(SPF/DB)成形各种大型复杂夹层中空整体结构。因此,随着材料设计和材料制备工艺的不断进步和推动,新型高温钛合金 SPF/DB 夹层中空结构成为高马赫数飞行器的优选减重结构。新型高温钛合金 SPF/DB 复杂构件的成形工艺实现和质量可靠

性问题已经成为高马赫数飞行器发展中迫切需要研究和解决的重要课题。

在工艺上,我国已突破 SPF/DB 的主要关键技术,在腹鳍、叶片、翼面等产品方面已形成较稳定的工艺体系。但在转入工程化阶段相关研究方面,我国仍处在起步阶段,面向产品全生命周期的质量可靠性研究成为钛合金 SPF/DB 构件能否在新一代飞行器上进行推广应用的关键。SPF/DB 结构扩散界面缺欠跨越微观、介观和宏观的多个尺度,不仅受界面精度、温度、压力、时间等扩散条件的影响,而且也受到材料微观组织、元素扩散性能、热力学条件等因素影响。影响的因素越多,缺欠的表现形式就越复杂,检测结果的可靠性就越难判断,而且受到现有无损检测方法的局限。

国外已基本解决了 SPF/DB 技术问题,以及相关产品的质量检测问题,并实现了工程化应用^[1-2]。国内在 SPF/DB 结构扩散界面可靠性检测方面也进行了一些尝试性的研究工作。例如北京航空制造工程研究所、航天特种材料及工艺技术研究所等单位针对钛合金 SPF/DB 结构的接头质量进行了超声检测和射线检测,并结合金相分析,初步得出,超声 C 扫描可用于扩散界面的质量检测,X 射线检测可在一定程度上检测封闭空心结构内部界面的扩散情况^[3-4]。但是,目前的检测方法研究主要针对简单的扩散连接界面,仍停留在检测方法有效性摸索阶段。

近年来,涡流检测技术有较快的发展,已广泛应用于航空、航天领域金属构件的检测中。通常用于检测航空发动机叶片裂纹、螺栓、螺孔内裂纹、飞机的多层机构、起落架、轮毂和铝蒙皮下等表面和亚表面缺欠,同时用于检测机翼连接焊缝的缺欠等。计算机及信号处理技术的迅猛发展,又大大促进了涡流检测技术的发展^[5]。但与其他检测技术相比,涡流检测还未被充分开发,涡流检测应用于 SPF/DB 结构检测的研究报道较少。本文应用涡流 C 扫描对钛合金 SPF/DB 结构进行了检测实验,将涡流 C 扫描结果和 SPF/DB 结构检测中常用的超声 C 扫描结果进行对比分析,着重讨论了该检测方法在 SPF/DB 结构检测中的可行性和存在的问题。

* 航天三院创新基金项目。

1 SPF/DB 结构特点及缺欠类型

扩散连接接头焊合率高,表面平整,外形与模具型面相一致,具有优良的力学性能和组织结构。对于双曲率、变厚度的壁板、翼面,这种工艺结构可以取代铝蜂窝胶接、铆接结构。

钛合金 SPF/DB 组合工艺按结构特点可分为 3 类:加强板结构、整体加强结构和夹层结构。在航空、航天器上应用价值最大的是四层板结构,这种结构能充分发挥材料工艺的特性,是钛合金 SPF/DB 组合工艺发展的新阶段,适用于导弹、火箭的各种翼面^[6]。某 SPF/DB 四层板结构如图 1 所示。

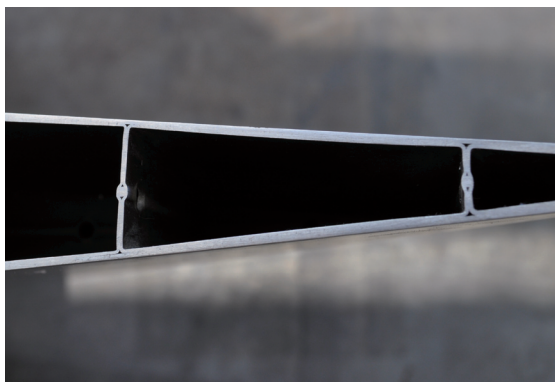


图1 SPF/DB四层板结构
Fig.1 Four-layer SPF/DB structure

根据缺欠成因及特征,可以将 SPF/DB 结构的主要缺欠类型分为 4 大类:表面缺欠、内部结构缺欠、界面宏观缺欠和界面微观缺欠。

在 SPF/DB 成形过程中,由于气路排布不合理、工艺参数不当或模具设计等问题,而在产品表面形成的缺欠,如工件表面的氧化、塌陷和局部凹坑等宏观可见缺欠,即为表面缺欠。

内部结构缺欠主要是由工艺结构因素所决定的,主要有扩散筋偏离、泡间三角区大小、芯层结构形态不正常等。

在实际的科研生产过程中,由于扩散连接表面的污染和工艺参数的失控等,可能在连接界面产生缺欠,这些缺欠的间隙往往在毫米级,称为界面宏观缺欠。

在新材料或新工艺的摸索阶段,扩散连接过程中工艺参数会发生意外偏离,连接界面可能出现部分原子虽然有扩散运动,但并未得到充分扩散的情况。如果这种工艺因素的偏离变大,还可能导致整个扩散界面原子得不到充分扩散,被连接界面仅为十分紧贴的物理接触。从界面之间的焊合程度来看,界面区域存在着弥散型、紧贴型缺欠,即为界面微观缺欠^[7]。

2 目前 SPF/DB 结构常用检测方法

目前,国内外在扩散连接检测方面的研究主要使用两种方法:超声检测和射线检测。超声检测是基于不同介质的界面具有不同的声学性质、反射或透射超声波的能力不同的原理,通过观察与分析反射波或透射波的时延与衰减情况,来检查扩散界面的微小缺欠,从而得到扩散界面的微观完整性信息。超声检测灵敏度较高,但定性不准,并且对形状复杂工件的检测有一定限制^[8-9]。

射线检测的实质是根据被检工件与其内部缺欠介质对射线能量衰减程度不同,而引起射线透过工件后的强度差异,使缺欠能在射线底片或 X 光电视屏幕上显示出来^[10]。射线检测中,如果缺欠的间隙极小,则在相同的透照情况下可以得到底片的相应对比度很小,此时在底片上无法形成可分辨的黑度差^[11]。所以,射线检测比较适用于检测芯层材料变形缺欠、夹层结构界面脱焊缺欠等宏观缺欠以及封闭空心结构内部芯层的形态等,对检测界面微观缺欠的难度较大,很难达到对该类缺欠的检测要求。

3 SPF/DB 结构检测实例

3.1 涡流 C 扫描原理

涡流检测是利用电磁感应原理,通过测定被检工件内感生涡流的变化来发现缺欠的无损检测方法。由电源向激励线圈提供一定频率和幅度的电流,在线圈中产生涡流场,当该涡流场移过工件后,涡流场的强度发生改变,通过信号检测电路产生涡流信号,该信号经放大和过滤后在显示器上显示,通过分析信号的幅值和相位来评价缺欠的大小^[12]。

近年来,微机控制和由微机进行数据采集、存储、处理、显示的 C 扫描技术发展很快,该技术以 C 型显示为基础,通过控制闸门的位置和宽度,可以显示出工件一定范围内的缺欠信息,显然最适合检测一定缺欠深度的工件。对存储的数据,可随时任意改变探伤阈值的设置,重新做出评估,不必重新检测。

涡流 C 扫描适用于检测表面缺欠、近表面缺欠以及一定深度的内部缺欠,并且必须有一定尺度的间隙存在,以保证该部位的电磁特性出现一定差异。涡流检测具有简便、不需要耦合剂和容易实现高速自动检测的优点,采用多频多参数涡流检测法,可以同时给出多种测量信息和数据。钛合金为顺磁性金属,相对磁导率约为 1 并且电导率低,相同激励频率下的渗透深度较大,适合检测出多层结构中较深部位的缺欠。

3.2 检测实例

以 SPF/DB 密集方泡四层板结构翼面为对象,其外

部蒙皮及内部方泡结构如图 2 所示。材料为 TA15。采用涡流 C 扫描从上方进行检测,以超声 C 扫描检测结果进行对照,并对两种方法的检测结果进行对比分析。扫描区域为 260mm × 140mm 中间区域,如图 2(a) 所示。

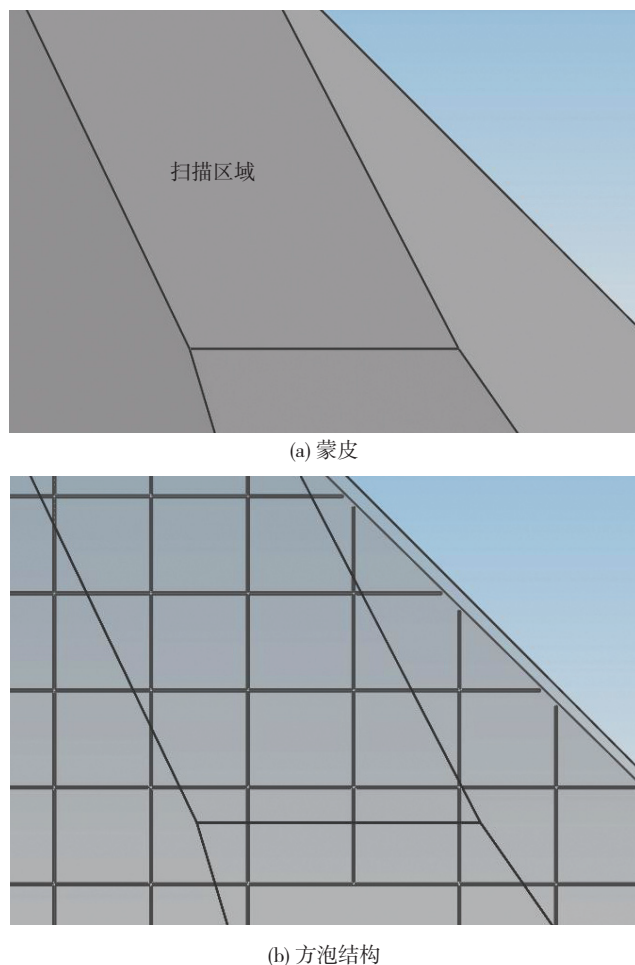


图2 密集方泡四层板结构翼面
Fig.2 Four-layer structure wing

涡流 C 扫描采用 35++ 型探伤仪,平探头,自比较式差动检测线圈,检测频率为 500kHz,增益为 50dB,扫描间距为 1mm,步进间距为 1mm。

超声 C 扫描采用穿透法进行检测,使用水浸聚焦探头,频率为 25MHz。

4 检测结果分析

4.1 超声 C 扫描结果

图 3 给出了扫描区域的超声 C 扫描图。超声 C 扫描采集的脉冲信号是闸门内的最大信号,超过示波器和满示波器的信号作为最大的信号来处理 (100%),低于示波器的信号不采集在内 (0%)。在示波器内的信号从小到大分为 256 级,在实际显示过程中,将某个范围段的

信号值用一种颜色表示,在 C 扫描图像上显示的颜色代表相应的超声波幅值范围。

由图 3 可以看出,超声 C 扫描可以检测出蒙皮—芯层之间以及芯层结构之间的焊合程度。芯层结构之间的扩散筋以及芯层结构与蒙皮之间的泡间三角区可以得到明显表征,如图中 I 区所示。蒙皮—芯层之间的扩散界面存在间隙型缺欠,如图中 II 区所示。蒙皮—芯层之间的扩散界面存在微小的弥散型缺欠,如图中 F 所示。

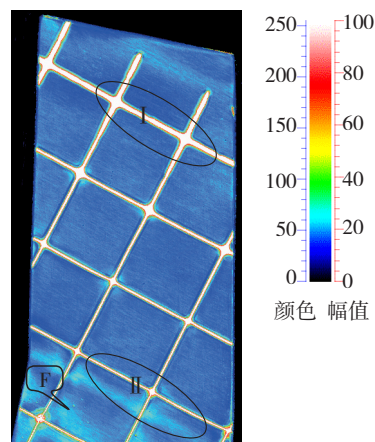


图3 超声C扫描图
Fig.3 Ultrasonic C-scan image

4.2 涡流 C 扫描结果

图 4 给出了扫描区域的涡流 C 扫描图。将涡流 C 扫描结果和超声 C 扫描结果进行对比分析,可以得出,涡流 C 扫描结果与超声 C 扫描结果大致吻合较好,在超声 C 扫描检测中发现有间隙以及间隙型缺欠的区域内,涡流 C 扫描的幅值对应较一致,有良好的检出效果,如图 4 中 I 区和 II 区所示。但对于图 3 中 F 所示的弥散型缺欠,在该仪器配置和检测参数设置下,未能检出。

涡流 C 扫描能够检测出 SPF/DB 结构的界面宏观缺欠以及一定尺度以上的界面微观缺欠,但对扩散界面弥散型、紧贴型缺欠的检出率较低。涡流 C 扫描在 SPF/

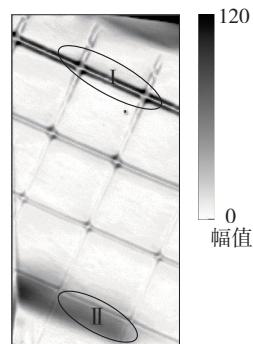


图4 涡流C扫描图
Fig.4 Eddy current C-scan image

DB 结构检测中是可行的,有必要对该检测方法的有效性和检测结果的可靠性进行深入研究。

5 结束语

通过对钛合金 SPF/DB 结构的检测实验,初步证实涡流 C 扫描在 SPF/DB 结构检测中是可行的。涡流 C 扫描能够检测出 SPF/DB 结构的界面宏观缺欠以及一定尺度以上的界面微观缺欠,但对扩散界面弥散型、紧贴型缺欠的检出率较低,仅依靠涡流检测通常也难以区分缺欠的种类和形状。

在后期的研究过程中,有必要通过制备对比试块、规划检测实验,进一步探讨该检测方法的有效性和检测结果的可靠性,使涡流 C 扫描在 SPF/DB 结构检测中得到深入应用。

由于 SPF/DB 结构复杂,适于扩散连接的检测方法也各有其一定的适用范围和特点,很难用一种方法鉴定缺欠并评价其可靠性,经常需要使用其它方法验证。因此,对 SPF/DB 结构进行检测时,应视产品的结构、使用要求等,选用多种方法检测或采用多种方法组合检测,在条件允许的情况下可进行剖切和金相分析,进一步确定 SPF/DB 结构扩散界面的可靠性。

参考文献

- [1] Matson D M, Lansaw J T, Suits M W, et al. Ultrasonic inspection of diffusion bonded platelet rocket chamber liner. *Materials Evaluation*, 1993, 51(5): 545-551.
- [2] Kapranos P, Priestner R. NDE of diffusion bonds. *Metal and Materials*, 1987, 3(4): 194-198.
- [3] 刘松平, 陈积懋. 大密度金属钎焊蜂窝构件超声检测与缺陷识别技术的研究. *无损检测*, 1995, 17(10): 271-282.
- [4] 刚铁, 李伟力. 扩散焊接头质量检测的研究现状. *焊接*, 2000, 5: 6-10.
- [5] 游凤荷. 涡流检测技术的某些新进展. *无损检测*, 2001, 23(2): 70-77.
- [6] 曹运红. 钛合金成型工艺在飞航导弹上的应用研究. *飞航导弹*, 2002, 7: 50-60.
- [7] 刘松平, 郭恩明, 谢凯文, 等. 钛合金扩散焊中紧贴型缺陷的超声波检测. *无损检测*, 2006, 26(2): 62-65.
- [8] 李国华, 吴森. *现代无损检测与评价*. 北京: 化学工业出版社, 2009, 75-76.
- [9] 刘贵民. *无损检测技术*. 北京: 国防工业出版社, 2006, 11-12.
- [10] 刚铁, 高桥康夫. 扩散连接接头质量评价现状. *无损检测*, 2003, 25(8): 410-414.
- [11] 单黎波, 金作花, 贺云龙, 等. 液体火箭发动机钎焊、扩散焊质量检测技术研究. *火箭推进*, 2009, 35(6): 47-51.
- [12] 颜家元, 潘红良. 涡流检测在带钢焊缝质量评价中的应用. *机械工程与自动化*, 2009, 4: 125-127.

(责编 亦雅)

(上接第 76 页)

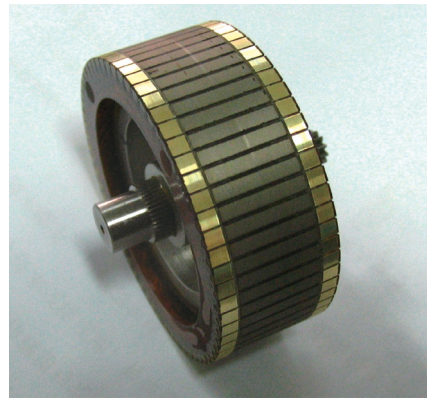


图5 电机样机
Fig.5 Motor prototype

图纸要求;换向器最终表面硬度达到 HV160, 双侧换向片片间等分精度小于 14", 满足了图样的指标要求;调试后换向火花小, 达到绝缘要求;电机整体性能优良。

参考文献

- [1] 戴文进, 徐龙权. *电机学*. 北京: 清华大学出版社, 2008.
 - [2] 《贵金属材料加工手册》编写组. *贵金属材料加工手册*. 北京: 冶金工业出版社, 1978.
 - [3] 《航空制造工程手册》总编委会. *航空制造工程手册·电机电器工艺分册*. 北京: 航空工业出版社, 1994.
 - [4] 高军. *金属塑性成形工艺及模具设计*. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- (责编 亦菲 良辰)

(上接第 78 页)

达到 30MPa 后应变曲线出现一个平台, 38MPa 后应力才又开始上升; 3 号点应变梯度均匀, 但是应变值小, 这说明这 2 个位置上的外层纤维出现了松散或褶皱, 可能是固化时最外层纤维部分脱落引起的。

3 结论

自制的树脂体系 (HPAR) 与碳纤维浸润性良好, 纤维强度转化率达到了 96.6%; 壳体爆破压强为 49.5MPa, 特征参数为 41km。

参考文献

- [1] 邓杰, 成敏苏. 大尺寸 CFRP 固体火箭发动机壳体湿法缠绕用树脂配方研制. *宇航学报*, 2010, 31(2): 556-561.
- [2] 李海东, 程凤梅, 周文英, 等. 一种水容器壳体湿法缠绕环氧树脂体系. *复合材料学报*, 2005, 22(3): 40-44.
- [3] 黎昱, 陈维强, 林大庆, 等. 缠绕成型复合材料壳体及基体改性研究. *宇航材料工艺*, 2009, 39(5): 61-64.
- [4] 陈平, 蹇锡高, 陈辉, 等. 碳纤维复合材料发动机壳体用韧性环氧树脂基体的研究. *复合材料学报*, 2002, 19(2): 24-27.

(责编 深蓝)