

高性能环氧/碳纤维缠绕壳体制备及其性能研究

Preparation and Property of High-Performance Epoxy/Carbon Fiber Winding Case

中国航天科工集团第六研究院 41 所 郑红飞 郭晓东 栗永锋

[摘要] 介绍了一种高性能环氧基碳纤维固体火箭发动机壳体的制备,分析了壳体水压爆破压强、容器特征参数(pV/W)和应变,找出了影响壳体性能的因素。

关键词: 固体火箭发动机壳体 爆破压强 容器特征参数

[ABSTRACT] The preparation of a high performance carbon fiber reinforced epoxy resin case for solid rocket motor is introduced, case water burst pressure, case characteristic parameter and strain are analyzed, and the factors affecting case performance are found.

Keywords: Solid rocket motor case Burst pressure Case characteristic parameter

环氧/酸酐体系粘度低、适用期长,适用于湿法缠绕成型,尤其是大型制品缠绕。但是,此体系的缺点在于酸酐固化剂容易吸湿,因此对生产环境的温度、湿度要求比较高。当环境湿度较高时,酸酐容易吸收空气中的水分发生水解,生成羧酸。羧酸与环氧树脂反应不能得到足够的交联密度,导致树脂强度和耐热性有较大幅度降低^[1-4]。

因此,我们研制了一种耐吸湿性能好的高性能树脂体系(HPAR)。本文介绍了以其作为树脂基体的碳纤维增强固体火箭发动机壳体的制备及其性能研究。

1 壳体制备

1.1 原材料

1.1.1 碳纤维

T700-12K,由日本东丽公司提供,其力学性能见表 1。

表1 碳纤维力学性能

拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /MPa	断裂延伸率 /%
4900	230	2.1

1.1.2 树脂

自制环氧树脂体系(HPAR),其性能见表 2 和表 3。

1.2 试验设备

(1) 缠绕机;(2) 烘箱。

1.3 制备工艺

表2 树脂浇注体性能

拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /MPa	断裂延伸率 /%	玻璃化转变温度 /℃
100	3.9	3.0~3.5	140

表3 NOL环性能

拉伸强度 /MPa	剪切强度 /MPa
2500	70

壳体缠绕成型工艺流程如图 1 所示。

- (1) 芯模采用砂芯模;
- (2) 采用湿法缠绕成型工艺,按张力递减制度缠绕;
- (3) 单团纱缠绕;
- (4) 缠绕层数为 8 层纵向,10 层环向。

壳体结构及外观如图 2、图 3 所示。

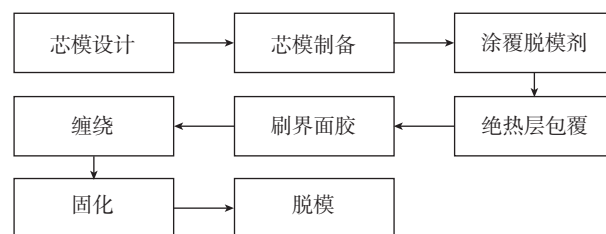


图1 壳体缠绕成型工艺流程图

Fig.1 Flow chart of case preparation process

2 壳体性能

2.1 爆破压强

2.1.1 爆破压强测试设备和方法

试验设备: 发动机壳体水压测试系统。

测试方法: 参照《QJ2039-91 固体火箭发动机纤维缠绕燃烧室壳体内压试验方法》执行。试验准备如图 4 所示。

图 5 是水压爆破后的壳体,可以看出,破坏位置为筒段。表 4 为壳体水压爆破性能数据。壳体爆破压强为 49.5MPa,说明壳体承受内压能力比较好。环向纤维发挥强度为 4733MPa,纤维强度转化率达到 96.6%,说明树脂与纤维的匹配性很好;这是因为,碳纤维的延伸率为 2.1%,树脂体系的延伸率为 3.5%,有利于碳纤维

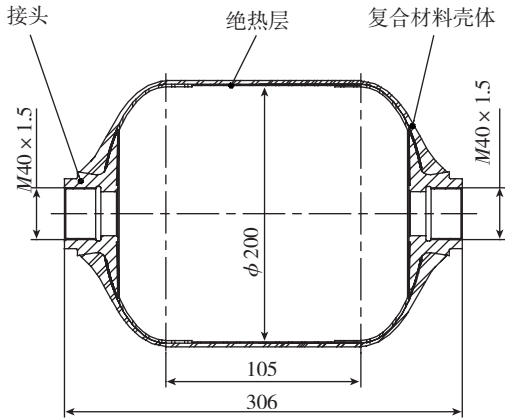


图2 壳体结构简图
Fig.2 Structure of case



图3 壳体外观
Fig.3 Case appearance

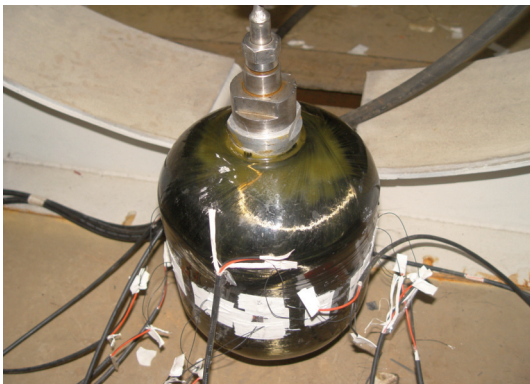


图4 壳体水压试验准备
Fig.4 Test preparation of case water pressure

充分发挥其强度, NOL 的剪切强度为 70MPa 也说明了树脂与纤维的浸润性良好。

但是,壳体的纵向纤维发挥强度只有 3016MPa,强度转化率仅为 61.6%。这说明壳体设计时纵向富余比较多,导致纵向纤维强度没有充分发挥。

2.2 容器特征参数

容器特征参数被用来衡量复合材料壳体的性能。定义为 $\zeta = pV/W$ (p 、 V 、 W 分别为容器爆破压强、容积



图5 爆破后的壳体
Fig.5 Case after water pressure burst

表4 壳体爆破性能数据

纵向纤维发挥强度 /MPa	3016
环向纤维发挥强度 /MPa	4733
$(pV/W)/\text{km}$	41
爆破压强 /MPa	49.5
纤维强度转化率 /%	96.6
复合材料重量 /g	791
破坏位置	筒段

和结构质量)。

根据爆破压强、壳体质量和体积计算,容器特征系数为 41km。壳体的纵向富余增加了复合材料的重量,因此,容器设计参数还需进一步改进,使纵向和环向应变更加合理,则容器特征系数会进一步提高。

2.3 壳体水压试验应变分析

壳体水压爆破过程中,应变可以反映出壳体在承受内压过程中纤维的受力情况。图 6 是壳体水压爆破过程中的环向不同位置的应变数据。可以看出,各点环向应变梯度比较均匀,这说明整体上各层纤维受力均匀。但是有个别点出现异常,例如,2 号点在容器内部压力

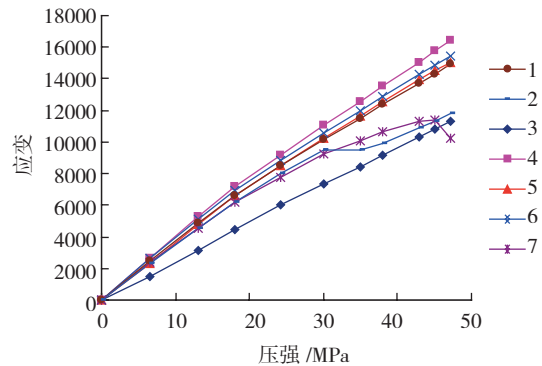


图6 壳体爆破环向应变数据
Fig.6 Strain data of case burst

(下转第 82 页)

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)

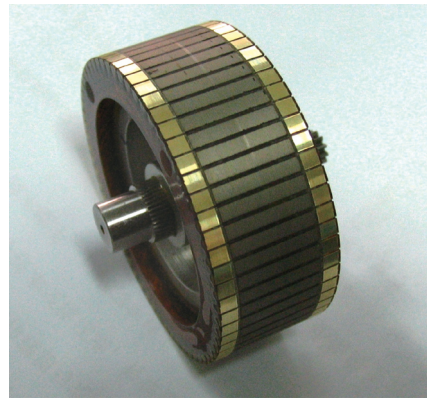


图5 电机样机
Fig.5 Motor prototype

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)