

卫星用复合材料气瓶性能

张建宝 林松 王俊锋 孙宏杰 蒋文革

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 通过对环氧树脂、NOL 环力学性能、金属内衬表面性能、复合材料真空质损和复合材料气瓶性能等进行研究和分析,研制出一种用于卫星推进系统的复合材料气瓶。结果表明:该复合材料气瓶经 150 次疲劳试验后爆破压强为 86 MPa,容器特征系数达 57.7 km,且满足真空使用环境要求。

关键词 纤维缠绕,复合材料气瓶,爆破压强,碳纤维

Performance of Composite Overwrapped Pressure Vessel Applied on Secondary Planet

Zhang Jianbao Lin Song Wang Junfeng Sun Hongjie Jiang Wenge

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract The experiments are studied in epoxy resin cast mechanical property, NOL hoop mechanical property, surface property of metallic inner wall, vacuum outgassing of composite and composite pressure vessel, aimed to the manufacturing of composite overwrapped pressure vessels(COPV) on the propulsion system of satellites. The result shows that the burst pressure of the COPV is 86 MPa after 150 times fatigue experiments, the vessel characteristic factor is 57.7 km, and the COPV is suitable for the application needing in vacuum.

Key words Filament wound, Composite pressure vessel, Burst pressure, Carbon fiber

0 引言

复合材料气瓶具有质量轻、压力容限高、可靠性高、抗疲劳、耐腐蚀等优点,是一种比较理想的轻质高强、高性能气瓶,能够满足航天部件高效、减重的要求。国外已经在运载火箭、航天飞机、人造卫星、空间站等航天器系统中使用了复合材料气瓶,如:HS 2601、HS 2702 卫星平台,FS 21300、Eurostars 22000 卫星平台,Centaur 运载火箭上面级以及航天飞机等^[1-7]。航天器的成功发射所需的巨额成本和潜在技术风险,对复合材料气瓶在减重、可靠性、压力容限等方面提出了苛刻的要求,复合材料气瓶已发展成为航空航天结构动力系统的关键组成部件之一^[2-8]。

本文以卫星推进系统复合材料气瓶研制为目标,通过对环氧树脂力学性能、NOL 环力学性能、金属内衬表面粘结性能、复合材料真空质损和复合材料气瓶性能进行试验研究。

1 实验

1.1 材料

TDE-85 环氧树脂,天津津东化工厂生产;环氧稀释剂、胺类固化剂,自制;碳纤维 T1000 (12K),日本东丽公司,性能见表 1。试验件内衬为 10 L、TC4 内衬。

表 1 碳纤维性能

Tab.1 Properties of carbon fiber

拉伸强度/ GPa	拉伸模量/ GPa	断裂伸长 率/%	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	线密度/ $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$
6.37	294	2.2	1.80	485

1.2 试样及气瓶的制备

1.2.1 树脂浇铸体制备

将树脂各组分按照一定的配比混合均匀,真空脱泡,然后浇铸到事先预热的拉伸试样模具中,加温固化,脱模制得试样。

1.2.2 NOL 环制备

按照 GB/T2578—1989 制备复合材料 NOL 环拉伸及层剪试样。

1.2.3 气瓶制备

收稿日期:2013-03-15;修回日期:2013-04-25

作者简介:张建宝,1982 年出生,博士,研究方向为复合材料自动化成型及工艺优化。E-mail:zhangjianbao703@163.com

以 TC4 钛合金为内衬材质,经机加工保证外形尺寸,后采用真空电子束焊接成型复合材料气瓶内衬;将 T1000 碳纤维浸渍树脂后,按照设定的缠绕角度、铺层顺序、缠绕张力、缠绕速率等参量,采用数控缠绕机依次逐层在金属内衬表面缠绕各缠绕层;在完成复合材料气瓶缠绕成型后,在专用烘箱中旋转固化,并进行后续试验研究。

1.3 试验方法

1.3.1 树脂浇注体性能

按 GB2568—1995 测试树脂浇注体的拉伸性能。

1.3.2 NOL 环力学性能

分别按照按 GB1458—1988、GB1461—1988 测试 NOL 环的拉伸以及层剪性能。

1.3.3 内衬表面处理试验

为确定较为合理的钛合金内衬的表面处理方法,制备了无处理措施、打磨处理和吹砂处理三种试片,并按 Q/Dq139—94 胶黏剂拉剪强度试验方法进行表面处理试片拉剪强度试验。

1.3.4 真空质损试验

按照 QJ1558—88 检测标准测试 T1000 碳纤维/环氧树脂在真空环境中的总质量损失及收集的挥发性可凝物。

1.3.5 复合材料气瓶水压、疲劳及爆破试验

复合材料气瓶进行 0~20~0 MPa、0~45~0 MPa 的水压自紧压力试验,而后进行 0~30~0 MPa 的 150 次疲劳试验,验证气瓶的水压疲劳性能,最后进行水压爆破试验。

2 结果与讨论

2.1 树脂浇注基体性能

环氧树脂体系的浇注体力学性能如表 2 所示。树脂浇注体具备较高的拉伸强度,且韧性较好,可满足缠绕用树脂体系高韧性要求,有利于延缓气瓶受内压时基体树脂开裂的趋势,提高复合材料层间剪切性能以及内衬与复合材料层间的剪切性能。

表 2 树脂浇注体的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of resin cast

拉伸强度/MPa	拉伸模量/GPa	断裂延伸率/%
81.6	3.50	5.86

2.2 NOL 环性能

采用 T1000/环氧树脂湿法缠绕成型复合材料 NOL 环拉伸和 NOL 层间剪切力学性能如表 3 所示。

表 3 NOL 环力学性能

Tab.3 Mechanical properties of NOL hoop

拉伸强度/MPa	离散系数/%	层剪强度/MPa	离散系数/%
2925	3.58	74.5	3.50

所制备 NOL 环具有较高的拉伸强度,层间剪切性能较为优异,且两种力学性能测试数据的离散性较好,表明 NOL 环中基体和纤维之间浸润性好,界面性能优异。

2.3 内衬表面处理

如表 4 所示,吹砂处理后的 TC4 试片拉剪强度最高,平均拉剪强度为 23.0 MPa,且离散较小,远高于无处理措施和表面打磨处理的。

表 4 不同处理方式、下试片的拉剪强度

Tab.4 Tensile shear strength of samples with different treatment methods

表面处理方式	平均值/MPa	离散系数/%
未处理	13.3	11
打磨	13.7	26
吹砂	23.0	5.7

吹砂处理后的 TC4 试片拉剪破坏形貌如图 1 所示。在试片粘结区域存在明显的云片状浮胶层,表明基体树脂与吹砂表面粗化处理的 TC4 试片表面形成了良好的界面层,金属层与复合材料层的粘结强度显著增强,致使试样在拉剪载荷作用下从粘结基体胶层内剪切破坏。

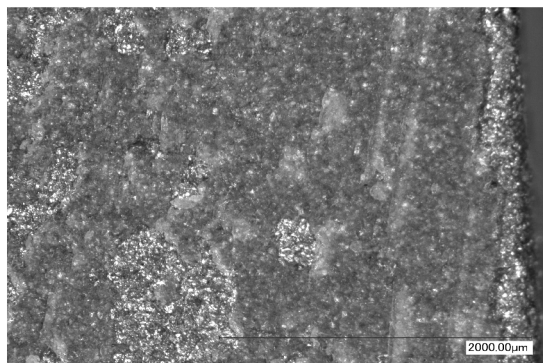


图 1 拉剪试样破坏区域

Fig.1 Failure sections of tensile shear specimens

吹砂处理可显著提高钛合金内衬的基体表面粘结特性,避免复合材料层与内衬因受内压延伸变形差异过大在界面上产生轴向及环向应力,甚至使复合材料层与金属内衬出现界面脱粘现象。

2.4 真空质损

T1000/环氧树脂体系在超高真空环境中,存在复合材料中包含的水、吸附性气体、溶剂、低分子量添加剂以及分解产物等以气态形式挥发至复合材料外的现象,使其复合材料构件产生质量损失。T1000/环氧树脂体系真空质损试验数据如表 5 所示。测试结果皆满足空间飞行器的材料真空质量损失 $\geq 1.00\%$ 、可凝挥发分的含量 $\geq 0.1\%$ 的指标要求,表明此材料体系满足在真空使用环境中长期服役的要求,可用于卫星推进复合材料压力容器的研制。

表5 真空质损试验结果

Tab.5 Result of outgassing in vacuum

真空总质量损失 TML/%	收集到的可凝 挥发物 CVCM/%	水蒸气回吸量 WVR/%
0.59	0.01	0.30

2.5 气瓶性能

采用研制的复合材料气瓶依次进行了 45 MPa 水压自紧压力试验、0 ~ 30 ~ 0 MPa 的 150 次疲劳试验以及水压爆破试验。

2.5.1 水压自紧

复合材料气瓶在 45 MPa 水压自紧试验过程中同期进行声发射检测,通过收集气瓶在受内压过程中的声发射信号评价气瓶的损伤程度。气瓶在 45 MPa 水压自紧试验过程中未出现异常情况,声发射信号逐渐减少,即气瓶在自紧过程中损伤信号趋于收敛,且 45 MPa 费利西蒂比(Felicity ratio)为 0.921,表明复合材料气瓶在水压自紧试验过程中各项性能指标较为优异。

2.5.2 水压疲劳

复合材料气瓶水压疲劳试验主要用于考核复合

材料气瓶的疲劳寿命,由于碳纤维复合材料在工作压力下处于弹性区间,疲劳性能较好,故复合材料气瓶的疲劳性能主要由金属内衬的疲劳性能决定。

复合材料气瓶经水压疲劳试验后,在 30 MPa 下进水量基本恒定,在疲劳试验过程中未出现明显的波动,表明复合气瓶满足 150 次疲劳寿命的要求,且性能较为优异。

2.5.3 水压爆破

复合材料气瓶经过 150 次疲劳后的爆破压力为 86 MPa,复合材料气瓶的容器特征系数(PV/W)相较于 T700 碳纤维压力容器特征系数 35 ~ 45 km,显著提高,达 57.7 km。复合材料气瓶在 150 次水压疲劳后,相对于工作压力 30 MPa 仍具有较高强度裕量。

复合材料气瓶水压爆破破坏模式如图 2 所示,破坏位置位于复合材料气瓶筒身段,且筒身段处横向纤维缠绕层和纵向纤维缠绕层断裂痕迹明显,表明复合材料气瓶筒身段纵向与环向强度的一致性较好,可以充分发挥纤维的强度。



图2 复合材料气瓶爆破破坏

Fig.2 Photographs of the composite vessel after blast test

3 结论

(1) T1000 碳纤维/环氧复合材料基体树脂拉伸强度为 81.6 MPa,断裂延伸率为 5.86%, NOL 环拉伸强度 2 925 MPa,层间剪切强度 74.5 MPa,力学性能优异,且基体环氧树脂纤维浸润性和韧性较好。

(2) 经吹砂处理后的试片环氧树脂拉剪强度为 23.0 MPa,表明 T1000 碳纤维/环氧复合材料基体树脂与金属内衬粘结性能良好,可在金属内衬和复合材料层之间的形成性能优异的界面层。

(3) T1000/环氧树脂体系复合材料真空质损为 0.59%,可凝挥发分的含量为 0.01%,达到空间飞行器材料真空质损的各项技术指标,可用于卫星推进复合材料压力容器的真空使用环境要求。

(4) 复合材料气瓶经 45 MPa 水压自紧和 150 次水压疲劳试验后,复合材料气瓶水压爆破强度为 86 MPa,容器特征系数达 57.7 km。

参考文献

[1] Haddock R C, Darms F J. Space system applications 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2013 年 第 4 期

of advanced composite fiber/Metal pressure vessels [J]. AIAA, 1990,2227:128

[2] Edgar E. Advances in Composite Fiber/Metal Pressure Vessels Technology [J]. AIAA,1989,2643:1210

[3] Morris E E, Segimoto M, Lynn V. Lighter weight fiber/metal pressure vessels using carbon overwrap [J]. AIAA, 1986, 1504:129

[4] Braun C A. Advanced composite fiber/Metal pressure vessels for space system applications [J]. AIAA, 1991, 1976:1211

[5] Chen H C, Chiu S T, Chang J B. Impact damage effects on composite over wrapped pressure vessels [J]. AIAA, 1999, 1321:1065

[6] 张天平. 空间应用压力容器研制技术 [J]. 上海航天, 2002(1):55-58

[7] 林再文,李涛,孙浩伟,等. 几种纤维复合材料压力容器的性能对比研究 [J]. 纤维复合材料, 2005(1):21-22

[8] 王荣国,矫维成,刘文博,等. 轻量化复合材料压力容器研究进展 [J]. 航空制造技术, 2009, 15:86-89

(编辑 吴坚)