

T800HB/环氧复合材料壳体爆破性能分析

周伟江 廖英强 张世杰 尤丽虹

(西安航天复合材料研究所,高性能碳纤维制造及应用国家地方联合工程研究中心,西安 710025)

文 摘 针对 T800HB/环氧复合材料壳体易在封头部位产生复杂的应力状态,导致壳体低压破坏的问题,通过采用金属接头结构优化与封头补强措施,使 T800HB/环氧复合材料壳体的爆破压力由 28.2 MPa 提高到 36.4 MPa,纤维强度发挥率由 65.7% 提升至 85.6%。

关键词 复合材料壳体,碳纤维,应变,纤维强度转化率

中图分类号:TB3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.03.026

Analysis on Burst Pressure of T800HB/Epoxy Composite Case

ZHOU Weijiang LIAO Yingqiang ZHANG Shijie YOU Lihong

(National and Local Union Engineering Research Center of High-Performance Carbon Fiber Manufacture and Application, Xi'an Aerospace Composites Research Institute, Xi'an 710025)

Abstract The complicated stress is easy to occur on the dome of T800HB/epoxy composite case, which cause case dome failure at low pressure. Through optimizing the joint flange and dome reinforcement, the burst pressure of T800HB/epoxy composite case increases from 28.6 MPa to 36.4 MPa. The fiber strength transfer rate increases from 65.7% to 85.6%

Key words Composite case, Carbon fiber, Strain, Fiber strength transfer rate

0 引言

采用碳纤维复合材料制造的发动机壳体刚性好、变形小,从而可减少推进剂药柱的变形,而且与绝热层的粘接要比其他纤维缠绕的壳体好,在战略、战术导弹的发动机壳体等结构部件上得到了广泛应用^[1]。

目前,国内的碳纤维壳体主要采用日本东丽公司生产的民用 T700 碳纤维,相比金属壳体已极大提升了装备的性能,促进了战略武器的更新换代。国外中模型碳纤维在固体发动机壳体上已得到了广泛应用,如美国的三叉戟 II-D5 导弹、侏儒导弹、大力神-4 火箭,法国的阿里安-2 火箭改型、日本的 M-5 火箭等发动机壳体都选用了中模型碳纤维^[2]。T800HB 碳纤维(拉伸强度及模量分别为 5.49 和 294 GPa,伸长率为 1.8%)是日本东丽公司研发的一种中模型碳纤维,同类产品还有美国赫克里斯公司的 IM6、IM7 碳

纤维以及阿莫科公司的 T-40 碳纤维。

本文以日本东丽公司生产的 T800HB 中模型碳纤维为研究对象,通过分析其复合材料壳体的爆破性能,为推动中模型碳纤维在新一代发动机壳体上的应用提供参考。

1 实验

1.1 原材料

T800HB-12000-50B 碳纤维日本东丽公司;环氧树脂配方,自制。

1.2 实验内容

采用湿法缠绕工艺按一定线型缠绕 $\Phi 150$ mm 壳体,壳体长 225 mm,固化后脱除芯模,按 GB6058—85 在自制设备上进行水压检测试验。

2 结果与讨论

2.1 T800HB 复合材料壳体性能

2.1.1 壳体结构的影响

修回日期:2014-01-21

作者简介:周伟江,1981 年出生,硕士研究生,主要从事固体火箭发动机壳体设计及结构强度研究。E-mail:527958645@qq.com

固体火箭发动机复合材料壳体主要由复合材料层、金属接头、内绝热层组成。碳纤维复合材料壳体一般采用缠绕工艺成型,筒段采用螺旋加环向缠绕,而封头是与圆筒纵向缠绕同时完成的,其厚度是极孔处最厚、赤道处最薄且与圆筒纵向层厚度相等,筒段和封头过渡区(赤道处)存在厚度突变。一般而言,封头赤道附近纬向承受压缩应力作用,而圆筒上靠近赤道附近纬向为拉伸应力,同时赤道位置存在着一定的弯曲作用;因此该部位处于拉伸、压缩、弯曲及剪切应力共同作用下的复杂应力状态^[3]。这样就使得赤道位置成为封头的薄弱环节,封头破坏往往起源于此,最终导致整个封头的破坏,甚至还殃及裙和圆筒。封头和金属连接件尖点靠近筒段部分,在载荷作用下会产生局部应力集中,易导致封头沿肩部外缘被剪(弯)断,此类现象的发生除了与封头厚度及肩宽比有关外,与肩部的刚度也有很大关系。以往常规的接头设计,肩部厚度是从肩根开始以线性关系减小到肩外缘的“零厚度”。这对玻璃纤维和有机纤维壳体的铝合金接头尚可行,但对于钢或钛合金接头的碳纤维壳体,当肩外缘的弯曲刚度很大时,会对封头产生很大的弯矩和轴向剪切应力集中^[4]。这对 T800HB/环氧复合材料壳体封头部位极为不利。图 1 为常规接头下 T800HB 碳纤维 $\Phi 150$ mm 壳体在设计爆破压力 34 MPa 下封头处的应变分布。

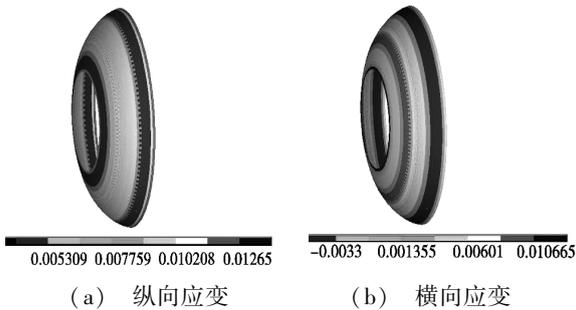


图 1 常规接头下壳体封头应变分布

Fig. 1 Strain of case dome of traditional joint flange

从图 1 可以看出, T800HB 碳纤维常规 $\Phi 150$ mm 壳体结构其封头上靠近金属件附近纵向缠绕层的最大纵、横向拉伸应变均为 1.3%, 处于一个较高的双向拉伸应变状态, 且封头上靠近赤道处存在较高的纵向拉伸应变值为 1.39%, 而 T800HB/环氧的 0° 拉伸应变极限也仅为 1.4% 左右。

2.1.2 结果与讨论

制备了三发 T800HB 碳纤维的 $\Phi 150$ mm 壳体进行了水压爆破试验, 计算了纤维的环向强度转化率 K , 对以上分析进行试验验证。结果见表 1, 水压后壳体残骸见图 2。

$$K = \frac{3p_b D}{4t_f \sigma} \quad (1)$$

式中, p_b 为爆破压力, D 为壳体直径, t_f 为纤维层厚度, σ 为纤维的复丝强度。

表 1 T800HB 碳纤维常规 $\Phi 150$ mm 壳体水压检测结果
Tab. 1 Result of hydraulic pressure of traditional T800HB carbon $\Phi 150$ mm case

试样	爆破压力/MPa	环向强度转化率/%
1#	28.2	65.7
2#	28.6	66.6
3#	27.8	64.8
均值	28.2	65.7

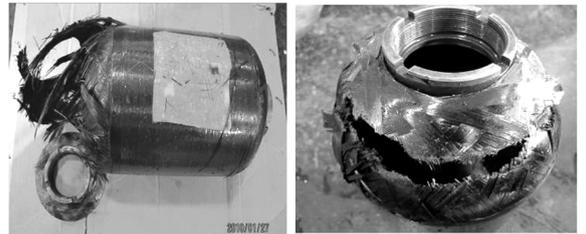


图 2 T800HB 碳纤维 $\Phi 150$ mm 壳体水压爆破残骸

Fig. 2 Burst debris of traditional T800HB carbon $\Phi 150$ mm case

由水压检测结果可以看出, T800HB/环氧复合材料壳体出现了封头部位低压破坏的现象, 纤维环向强度转化率仅为 65.7%, 纤维的性能优势并未得到体现。破坏模式一种是靠近赤道部位的封头发生断裂; 另外一种壳体沿接头肩部外缘被剪断, 这是在内压作用下, 此处产生了较大的弯矩和轴向剪切力, 开孔越大, 此弯矩和轴向剪切力就越大, 这对断裂应变和断裂韧性较低的 T800HB/环氧复合材料壳体尤为不利, 当此处的等效剪应力达到其等效剪切强度时, 就出现了金属接头肩部外缘处的复合材料封头被齐齐剪断的情况, 这与前期计算分析结果一致。

2.2 改善措施与结果

根据上述分析结论与试验结果可以看出, 现有的壳体结构对 T800HB/环氧复合材料壳体爆破性能有直接影响。解决措施首先应该适当减小金属接头肩部外缘的弯曲刚度, 缓解其对封头产生弯、剪应力集中, 同时通过壳体补强增加封头部位的材料厚度弥补强度不足。降低应力平衡系数也是一种快捷有效的手段, 但这会导致壳体纵向强度与材料富余, 结构效率并非最优。

2.2.1 金属接头结构优化

通过金属接头肩部外缘处的封头强度校核, 对金属接头内型面进行优化, 使其呈非线性弱化曲面。以 34 MPa 内压进行复合材料缠绕层设计, 分别对金属宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014 年 第 3 期

连接件弱化前后复合材料封头上的应变分布情况进行分析(图3)。

从图3可以看出,当金属件弱化后,封头上靠近金属件附近纵向缠绕层的最大纵向拉伸应变为1.01%,最大横向拉伸应变为1.17%,而封头上靠近赤道处的纵向拉伸应变大幅度降低到0.7%。同图2相比,总体来看,金属件附近的纵向拉伸应变降低了22.3%,横向拉伸应变降低了10%,赤道位置附近的纵向拉伸应变值降低了49.6%。因此,采用金属件弱化方案可以有效的降低封头上纤维缠绕层的应变。

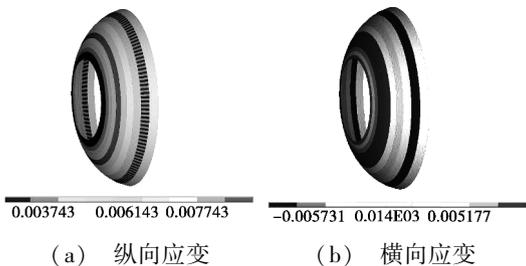


图3 金属连接件弱化前后封头上纵向缠绕层应变

Fig.3 Lengthways strain of dome by weakening joint flange

2.2.2 封头补强

通过对碳纤维复合材料壳体封头部位补强,增加铺层厚度,减小封头的局部应力集中,可弥补薄弱区

域的强度不足,从而提高壳体的内压承载能力,避免在水压检测时发生封头低压破坏现象,在满足壳体复合材料质量的前提下,尽量提高复合材料壳体水压爆破压力。根据 T800HB 碳纤维 $\Phi 150$ mm 容器纵、环向缠绕层应变分析,确定封头补强层的位置及厚度,制备的压力容器的水压试验结果见表2,残骸见图4。试验结果表明,采用结构优化的金属接头,并采取相应的封头补强措施,解决了 T800HB/环氧复合材料壳体封头低压破坏的问题,纤维环向强度转化率提高至 85.6%;水压爆破残骸可见,破坏位置均在容器筒段,纵、环向纤维强度得到了充分发挥。

表2 接头结构优化后 T800HB 碳纤维 $\Phi 150$ mm 容器水压检测结果

Tab.2 Result of hydraulic pressure of T800HB carbon $\Phi 150$ mm case by optimizing the joint flange

试样	爆破压力/MPa	环向强度转化率/%
1#	36.1	84.9
2#	36.6	86.1
3#	36.5	85.8
均值	36.4	85.6



图4 接头优化后 T800HB 碳纤维 $\Phi 150$ mm 容器水压破坏形貌

Fig.4 Burst debris of T800HB carbon $\Phi 150$ mm case by optimizing the joint flange

3 结论

(1) T800HB/环氧复合材料壳体在金属接头边缘部位及封头靠近赤道的位置产生了复杂的应力集中,导致壳体在内压试验中产生了封头低压破坏,纤维强度转化率偏低。

(2) 通过金属接头结构优化与封头补强,解决了 T800HB/环氧复合材料壳体低压破坏的问题,使壳体的爆破压力由 28.2 MPa 提高到 36.4 MPa,环向纤维强度转化率由 65.7% 提升至 85.6%。

参考文献

[1] 林德春,张德雄. 固体火箭发动机材料现状和前景展望[J]. 宇航材料工艺,1999(4):1-5
 [2] 冯志海. 关于我国高性能碳纤维需求和发展的几点想法[J]. 新材料产业,2010(9):19-24
 [3] 郭峰,张炜,王晓洁. 碳纤维/环氧固体火箭发动机壳体补强现状[J]. 纤维复合材料,2008,35(3):35-38
 [4] 陈汝训. 碳纤维壳体封头设计的几个问题[J]. 固体火箭技术,2009,32(5):543-547

(编辑 吴坚)