

碳纤维/环氧复合材料壳体补强新工艺 及方法对比研究

王欢 刘勇琼 廖英强 田蔚

(西安航天复合材料研究所,西安 710025)

文 摘 为了降低复合材料壳体封头区域的应力集中,提高壳体整体性能,对复合材料壳体薄弱区进行补强以及采用何种方法进行补强是关键问题。本文以碳纤维 $\Phi 150$ mm 复合材料壳体为研究对象,以理论分析和有限元分析为依据,分别采用碳布补强和纤维缠绕补强对壳体前后封头及赤道附近位置进行补强。试验结果表明:纤维缠绕补强效果明显好于碳布补强,壳体特性系数由 40.3 km 提高到 48.5 km,应力平衡系数提高到 0.95,纤维发挥强度由 3 378.1 MPa 提高到 4 058.4 MPa。

关键词 复合材料壳体,补强,壳体特性系数,应力平衡系数,纤维发挥强度

Comparison With New Reinforcement Technology of Carbon/Epoxy Composite Case

Wang Huan Liu Yongqiong Liao Yingqiang Tian Wei

(Xi'an Aerospace Composites Research Institute, Xi'an 710025)

Abstract To decrease the stress concentration on the dome of composite case, and improve the ability of the composite case, the key problem is how to reinforce the weakness of case and using which method to reinforce it. The $\Phi 150$ mm case of carbon fiber composites is studied in this paper, on the basis of theoretical analysis and finite element analysis, using carbon cloth and filament winding to reinforce dome and around equator of the case. As a result, the effect of filament winding reinforcement is better than carbon cloth reinforcement, case characteristic factor reaches to 48.5 km, stress equilibrium up to 0.95, developed fiber strength by 3 378.1 MPa to 4 058.4 MPa.

Key words Composite case, Reinforcement, Case characteristic factor, Stress equilibrium, Developed fiber strength

0 引言

20 世纪 90 年代,刘炳禹等^[1]在进行高性能碳纤维在固体火箭发动机壳体上应用研究的试验过程中发现,碳纤维复合材料壳体在水压爆破时的破坏部位绝大多数发生在金属件边缘,同时存在低应力爆破现象。分析认为,按网格理论设计的复合材料壳体虽然是一个等张力结构,但由于复合材料成型过程中影响因素极其复杂,加之开口附近的纤维堆积、架空等原因,封头附近容易产生应力薄弱区域。因此水压爆破的破坏位置多发生在封头部位,使筒段纵环向纤维的强度未得到充分发挥,导致壳体爆破压力偏低。

为了解决上述问题,刘炳禹等提出了对壳体进行封头补强的措施。他们提出了用布带铺放补强、无纬布铺放补强、纤维缠绕补强、封头帽补强、其他小范围局部补强法等方案。通过实验验证得到开展封头补强研究是提高壳体性能的一种有效方法,但是并未解决壳体什么时候需要补强以及在哪些位置补强才能达到最好效果等关键问题。

本文以碳纤维 $\Phi 150$ mm 加长壳体(图 1)为研究对象,以网格理论为基础,经过有限元结构分析后,以改进的网格理论为补充,分别采用两种不同的补强方法,开展封头补强试验研究。

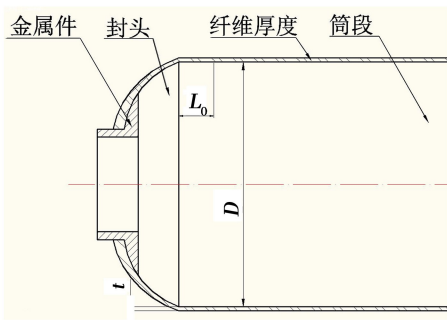


图1 Φ150 mm 壳体示意图

Fig.1 Schematic diagram of the Φ150 mm case

1 理论分析

1.1 网格理论

目前,国内对于纤维缠绕壳体尚无精确的力学分析方法^[2],在发动机复合材料初步设计阶段大都采用粗糙的网格理论来分析壳体受力情况,网格理论是一种基于大量实验数据上的半经验设计方法,且需作两点假设:

(1)壳体在内压作用下,全部载荷均有纤维承担,基体仅起支撑、保护纤维和在纤维间传递载荷的作用;

(2)所用纤维均按理想排布,因而他们都受到相同的轴向拉力作用。

网格理论初步确定了纤维层的所有环向缠绕厚度及螺旋纵向缠绕厚度。纤维缠绕壳体一般有螺旋加环向缠绕而成。在封头上无法实现环向缠绕,只能螺旋缠绕,且与圆筒的螺旋缠绕同时成型。圆筒部分则由螺旋加环向缠绕而成。

螺旋加环向纤维缠绕壳体在网格理论下的轴向和环向内力 T_z 、 T_θ 分别为:

$$\begin{cases} T_z = \sigma_b t_r k_s \cos^2 \alpha \\ T_\theta = \sigma_b t_r k_s \sin^2 \alpha + \sigma_b t_\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中, σ_b 为纤维发挥强度; t_r 、 t_θ 为纵向和环向纤维层厚度; k_s 为应力平衡系数; α 为纵向缠绕角。

缠绕圆筒段在内压 p 作用下,其轴向和环向内力 N_z 、 N_θ 分别为:

$$\begin{cases} N_z = \frac{1}{2}Rp \\ N_\theta = Rp \end{cases} \quad (2)$$

式中, R 为壳体半径。

纤维缠绕壳体在网格意义下处于平衡时,有 $T_z = N_z$ 、 $T_\theta = N_\theta$ 。由此螺旋加环向缠绕壳体在网格理论下的平衡方程^[3]为:

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2013年 第2期

$$\begin{cases} \sigma_b t_r k_s \cos^2 \alpha = \frac{1}{2}Rp \\ \sigma_b t_r k_s \sin^2 \alpha + \sigma_b t_\theta = Rp \end{cases} \quad (3)$$

由于 R 和 p 是预先给定的,因此,由式(3)得到壳体的纵向和环向纤维厚度分别为:

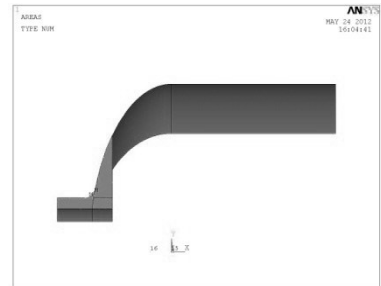
$$\begin{cases} t_r = \frac{Rp}{2\sigma_b t_r k_s \cos^2 \alpha} \\ t_\theta = \frac{Rp}{2\sigma_b} (2 - \tan^2 \alpha) \end{cases} \quad (4)$$

这种网格分析方法通常是做小型的实验壳体进行水压爆破试验,由试验得到的实测爆破压力 p_b ,然后通过式(4)反算出强度 σ_b ,称为纤维发挥强度,以此作为实际壳体设计的性能指标。

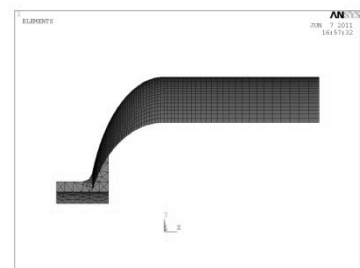
1.2 有限元分析

开展复合材料壳体的 ANSYS 有限元结构分析设计^[4],不仅可以为补强技术提供理论依据,还可以进行补强方法的优化设计,有效达到补强效果,提高壳体的整体性能。

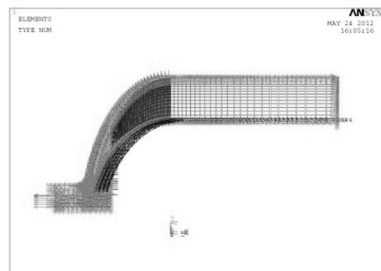
根据复合材料 Φ150 mm 壳体基本几何尺寸,定义回转体剖面上的关键点、线、面,利用回转体生成 1/16 几何体,采用壳体单元^[5]建立的有限元模型,并施加载荷进行受力分析,如图2所示。



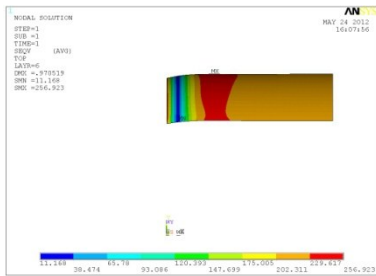
(a) 1/16 模型



(b) 网格划分



(c) 施加约束和载荷的模型



(d) 应力云图

图2 有限元模型和应力云图

Fig. 2 Finite element model and stress analysis

壳体的整体结构可以简单的认为是由金属件和复合材料组成的,而金属件刚度远大于复合材料壳体刚度,容易造成复合材料壳体应力、应变水平较高。通过有限元对该模型的数值仿真计算结果[图2(d)]知,过赤道线20 mm范围附近轴向应力较高。因此,若提高壳体整体性能,需考虑过赤道20 mm处筒段位置的轴向补强。

1.3 改进的网格理论

由有限元分析结果可知,封头金属件及赤道位置附近是主要应力集中区域,其主要原因是由于金属件和复合材料刚度不匹配以及封头和赤道附近区域弯曲应力较大,而传统网格理论在设计过程中又很少考虑曲率造成的影响,因此,有必要通过补强来弥补薄弱区域的强度损失,以提高壳体的整体性能,在文献[1,6-7]中,几乎所有补强试验都是摸索试验,即通过实验观察确定补强位置,对补强具体的位置没有记载。现尝试在不改变网格理论设计方法的基础上,引入弯矩衰减公式^[8]:

$$e^{-\lambda L_0}(\cos \lambda L_0 + \sin \lambda L_0) \leq 0.05$$

$$\text{其中 } \lambda = \left(\frac{3}{R^2 t^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

式中, R 为半径, t 为壁厚, L_0 为过赤道到筒段的距离。

由于 $\Phi 150$ mm加长壳体中 R 和 t 都是已知,由此可以通过弯矩衰减公式的计算结果来确定 $L_0 = 21.2$ mm,与经过有限元分析得到的位置相符,本文根据该结果并考虑工艺实施的问题,对壳体在过赤道线25 mm处附近进行轴向补强试验。这种依据计算找到壳体薄弱区域,并对该区域进行补强的方法是对网格理论是一种改进,也是对补强新工艺的一种尝试。

2 碳纤维/环氧复合材料壳体的制作

2.1 原材料及设备

T700-12K碳纤维,密度 $\rho = 1.80 \text{ g/cm}^3$,线密度 $\rho_L = 810 \text{ tex}$, $\sigma = 49 \text{ GPa}$,日本东丽制造。

4315环氧树脂、LC-800卧式缠绕机,均为自制。

2.2 壳体制作工艺及方法

壳体设计采用改进的网格理论设计方法,试验中分别使用碳布铺放补强和纤维缠绕补强,并先后制作三发 $\Phi 150$ mm加长壳体,壳体制作工艺流程图如图3所示。

(1)碳布铺层补强,即在壳体完成一个纵/环向循环后,将裁剪少量切口的碳布,浸透树脂后环向铺放到壳体前后封头及过赤道 L_0 的筒段处,再完成剩余的缠绕层。

(2)纤维缠绕补强,即在壳体完成一个纵/环向循环后,再通过缠绕方式对从封头到过赤道 L_0 的位置补强,最后完成剩余的缠绕层。

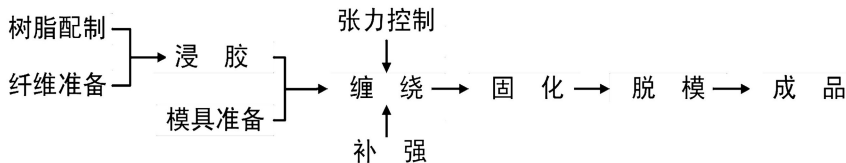


图3 壳体工艺流程

Fig. 3 Flowchart of case

3 结果与讨论

3.1 试验结果

将制作好的三发壳体,固化、脱模后进行常规水

压爆破试验,壳体爆破情况及参数见表1。图4为水压爆破后1#、2#、3#壳体的残骸。

表 1 壳体水压爆破后的性能参数

Tab. 1 Performance parameters after hydroburst of the case

壳体 ¹⁾	应力平衡系数	质量 /g	纤维发挥强度 /MPa	壳体特性系数 /km	爆破压力 /MPa	破坏位置
1 [#]	0.90	898.3	3378.1	40.3	29.3	封头与筒段结合处
2 [#]	0.95	902.9	3931.5	46.6	34.1	筒段
3 [#]	0.95	896.2	4058.4	48.5	35.2	筒段

注:1)1[#]壳体采用碳布铺放补强;2[#]、3[#]壳体采用纤维缠绕补强。

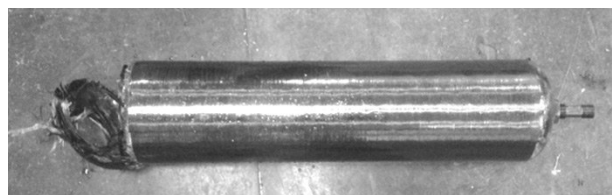
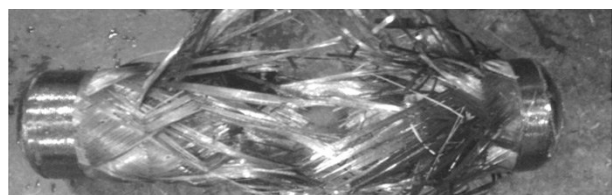
(a) 1[#](b) 2[#](c) 3[#]

图 4 壳体水压爆破残骸

Fig. 4 Wreckage of case after hydroburst

3.2 结果讨论

从表 1 中可见,纤维缠绕补强方法比碳布补强方法完成的壳体爆破压力分别高出 16.4%、20.1%,其爆破位置均出现在筒段位置,而碳布补强壳体的爆破位置则出现在封头上靠近赤道位置附近;因此,纤维缠绕补强壳体的爆破形貌较为理想。由此可以得出:纤维缠绕补强比碳布补强方法补强作用更为有效。

另外,2[#]壳体进行纤维缠绕补强时纤维损伤较大,从而降低了纵环向纤维发挥强度;因此,为减少纤维缠绕过程中的损伤,3[#]壳体是在 2[#]壳体的工艺状态基础之上进行了工艺改进,改进措施主要是防止纵环向纤维表面受到损伤,这样就使纵环向纤维强度得到充分发挥,3[#]壳体比 2[#]壳体的爆破压力高 3.2%。

从图 4 来看,碳布补强方法完成的 1[#]壳体水压爆破破坏形貌为封头脱落筒段完好,该现象说明纤维强度不能得到充分发挥;纤维缠绕补强方法完成的

(2[#]和 3[#])壳体水压爆破破坏部位在筒段,爆破形貌为纤维呈发散膨松状态,说明纤维缠绕补强方法使纤维的强度得到充分发挥。结合表 1 中数据可以看出,纤维缠绕补强方法比碳布补强方法完成的壳体纤维发挥强度由 3378.1 MPa 提高到 4058.4 MPa,壳体特性系数(PV/W)由 40.3 km 提高到 48.5 MPa。

4 结论

(1)以传统网格理论设计为基础,结合改进的网格理论的定量分析和设计方法,在本论文中得到验证,同时此设计方法基本解决了目前对如何找到补强位置和选择何种补强方式才是较为有效的等难题。

(2)对壳体封头及赤道附近位置进行补强后,壳体爆破时使纵向和环向缠绕层同时破坏。而采用碳布铺放进行补强的壳体,爆破时封头及赤道处首先破坏,纵向纤维强度不能得到充分发挥。采用从封头延伸至筒段局部区域的纤维缠绕补强方法,可使壳体的应力平衡系数达到 0.95,纤维发挥强度由 3378.1 MPa 提高到 4058.4 MPa,纤维强度得到充分发挥,表明纤维缠绕补强是一种较为有效的补强方法。

参考文献

- [1] 刘炳禹,张炜,王晓洁. 封头补强技术研究[J]. 固体火箭技术,1996,19(4):57-61
- [2] 王光林,等. 固体火箭发动机设计[M]. 西安:西北工业大学出版社,1994
- [3] 陈汝训. 纤维缠绕圆环压力容器设计分析[J]. 固体火箭技术,2006,29(6):446-450
- [4] 小飒工作室编. 最新经典 ANSYS 及 ANSYS Workbench 教程[M]. 北京:电子工业出版社,2004
- [5] 龚曙光,谢桂兰,编. ANSYS 操作命令与参数化编程[M]. 北京:机械工业出版社,2004
- [6] 王东. 某缠绕壳体补强工艺研究[J]. 制造技术研究,2007(2):36-37
- [7] 耿宇欣,强洪夫,王路仙. 复合材料壳体封头补强技术研究[J]. 纤维复合材料,2007,24(4):24-27
- [8] 杨 W,布迪纳斯编 R. 罗氏应力应变公式手册[M]. 岳珠峰等译,苟文选审. 北京:科学出版社,2005

(编辑 任涛)