

文章编号: 1001- 2486(2010) 01- 0045- 06

RTM 工艺整体成型复合材料连接裙轴压性能*

刘 钧, 肖加余, 曾竟成, 江大志, 彭超义
(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 整体成型的固体火箭发动机复合材料连接裙有助于连接裙的减重及其使用性能的提高。本文采用 RTM 工艺制备出了全复合材料整体连接裙并对其进行了轴压承载性能考核。试验结果表明, RTM 工艺整体成型的复合材料连接裙质量均匀, 在设计载荷作用下, 连接裙的轴向应变远小于 0.5% 的复合材料许用应变指标, 连接裙的轴向表观结构刚度为 40.9 GPa。

关键词: RTM; 复合材料连接裙; 轴压性能

中图分类号: TB332 文献标识码: A

Axial Compression Properties of Composites Adapter Skirt Integrally Manufactured by RTM

LIU Jun, XIAO Jia-yu, ZENG Jing-cheng, JIANG Da-zhi, PENG Chao-yi

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The integral manufacturing for composites adapter skirt used for solid rocket motor is very beneficial to lighter weight and higher properties of the skirt. The integral composites adapter skirt was designed and made by RTM process, and the axial compression test of the skirt was conducted. The experimental results show that under the effect of the design loading, the strain of the skirt is less than 0.5%, and the structural stiffness of the skirt reaches 40.9 GPa.

Key words: RTM; composites adapter skirt; axial compression properties

固体火箭发动机壳体连接裙是其壳体的整体延伸, 用于实现壳体级间段连接或与其他部件的连接^[1], 实现级间推力的传递, 作用非常重要。

根据连接裙端框的不同, 复合裙的结构形式可分为金属端框的非整体连接裙和复合材料端框的整体连接裙。带金属端框的非整体复合材料连接裙一般采用铝合金端框, 通过粘接、铆接等形式与复合材料筒身结合, 连接裙筒身与端框间存在不同的材料界面, 对连接裙的减重、使用性能会有一定的影响, 但制备工艺相对简单; 而具有复合材料端框的整体连接裙其端框、筒身采用的是连续、整体的复合材料结构, 端框与筒身间没有不同的材料界面, 结构减重明显, 但其成型难度较高, 国内外鲜有相关文献报道。

20 世纪 90 年代初, 国内开始了固体火箭发动机复合材料连接裙的研制工作。西安航天复合材料研究所研制的外加金属端框结构形式的连接裙, 主要适用于中长裙结构。该裙是采用混编布带干法缠绕成型的薄壁圆筒件, 轴压承载能力高^[2], 研制的混杂纤维复合材料连接裙则已应用于型号综合演示发动机及试验发动机上^[3]; 国防科技大学开展了 RTM 工艺成型全复合材料连接裙的研制工作^[4]。

某型带内翻边法兰的全复合材料连接裙结构如图 1 所示, 该型连接裙可以采用 RTM 工艺整体成型。成型过程中, 将连接裙的法兰、筒身段等结构采用连续纤维或纤维织物预成型后, 铺放在模腔中, 合模密封后, 再通过树脂注射, 一次整体成型全复合材料连接裙。整体成型制品性能优良: 一方面是减少了零部件、紧固件数量和协调连接装配的工作量, 进一步减轻裙体结构质量, 降低成本, 特别是制造成本^[5]; 另一方面, 整体成型的全复合材料连接裙, 不存在粘接金属端框所带来的应力集中、热胀系数不匹配、电化学腐蚀、低损伤容限等问题, 可以提高复合材料连接裙结构的承载能力和损伤容限。

* 收稿日期: 2009- 10- 25

基金项目: 国家部委基金资助项目

作者简介: 刘钧(1974-), 男, 副教授, 博士。

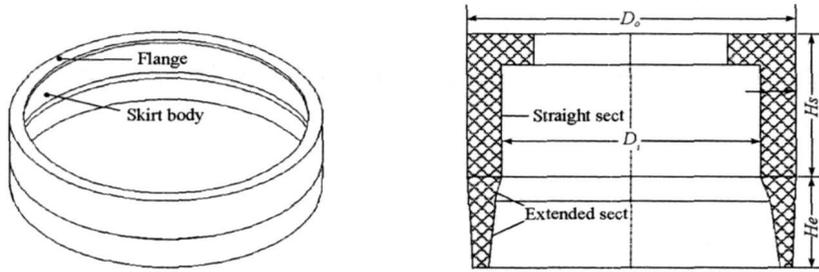


图1 复合材料连接裙基本结构示意图

Fig. 1 Sketch of composites skirt

1 RTM成型复合材料连接裙

1.1 试验用原材料

根据连接裙的使用性能要求和 RTM 工艺特点, 选用异佛尔酮二胺 (IPDA) 固化的 CYD-128 环氧树脂体系。IPDA, 化学纯, 北京丰特斯化工材料有限公司生产; CYD-128, 岳阳石化总厂环氧树脂厂生产。

为了低成本制备增强材料预成型体, 主要采用 1k 或 3k, T300 的碳纤维平纹织物进行铺层。为了增强连接裙的轴压承载能力, 在裙身铺层中添加了 12k, T700 的碳纤维单向带^[6]。

1.2 预成型体的制备

复合材料连接裙主要采用碳纤维平纹织物卷绕铺层, 即在圆筒状阳模上卷绕增强织物, 卷绕一圈后在织物层上缠绕纱线定型固定, 重复此过程, 使增强织物一层层卷绕在阳模上成型为所需的纤维增强体, 为了防止每层织物接口处的应力集中, 将相邻层的织物接口朝一个方向错动一定角度, 使得最终形成的纤维增强体中单层织物接口在整个圆周上呈均匀分布状态(图2)。在卷绕织物缠绕定型后, 将预留部分的直立卷绕层用剪刀沿复合材料连接裙轴向剪开成几十毫米长的小片段, 再逐段向阳模压板环下折插, 形成法兰部分的增强体(图3)。

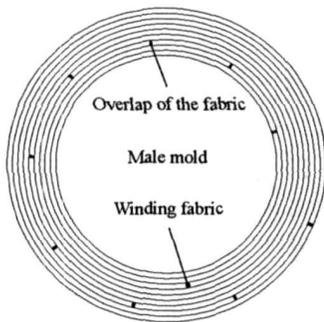


图2 织物卷绕层接口分布示意图

Fig. 2 Overlap distributions of the winding fabric

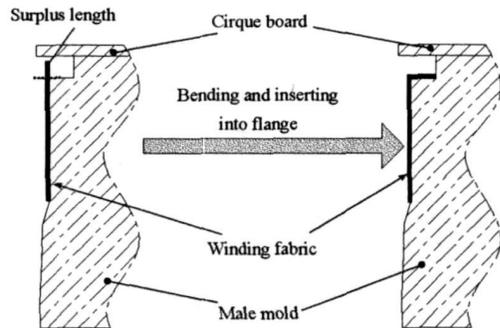


图3 卷绕织物折插法兰示意图

Fig. 3 Sketch of laminating for the composite skirt

为了改善复合材料连接裙的表面平整性, 在连接裙的内、外表面采用 1k 的碳纤维平纹织物铺层, 制品内部则采用 3k 碳纤维平纹织物铺层; 为了改善复合材料连接裙制品的轴压性能, 在裙壁中间层添加 12k, T700 碳纤维单向带, 增加轴向纤维含量, 同时, 单向带比较厚实, 不容易折弯 90° , 就直接将其沿复合材料连接裙筒壁直立铺覆, 不折插法兰。

1.3 RTM 工艺成型

将合模后的整套模具和 CYD-128 树脂放入烘房中预热后, 将 IPDA 固化剂按比例加入环氧树脂中, 搅拌均匀。同时对模具进行抽真空, 排出模腔中的空气后, 采用 RTM 注射机将树脂胶液注入模腔中, 注射压力为 0.3MPa, 充模时间为 20min。

注射完毕后,将烘房的温度上调,按设计的固化制度升温使复合材料连接裙固化。随炉冷却后,脱模即可得到最终的复合材料连接裙制品(图4)。制品内外壁表面光滑平整,没有明显的富胶、贫胶和缺胶的现象,在容易积胶的法兰拐角处也没有明显的富树脂堆积情况;裙体无干斑、裂纹、纤维冲刷、布层褶皱等缺陷;从机械加工断面可以看出,增强体纤维被树脂浸渍充分完全。

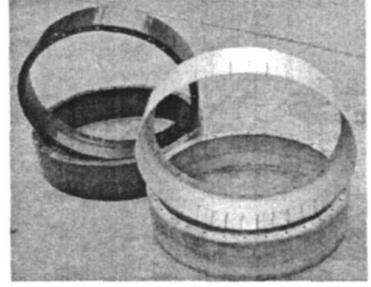


图4 RTM 工艺制备的复合材料连接裙照片
Fig.4 Composites skirts manufactured by VARTM

1.4 性能测试

复合材料连接裙是个变厚度圆筒结构,无法从连接裙上取样进行力学性能测试。本文测试的是同等条件下制备的复合材料随炉试样。在 WDW-100 电子万能力学性能试验机上按 GB/T1447-1983, GB/T1449-1983 分别测试复合材料试样的拉伸、弯曲性能。

类比复合材料连接裙在固体火箭发动机中的连接状态,加工一个下端面磨平的钢质工装,嵌套胶接在连接裙下端延伸段的内部,延伸段外部用纤维缠绕至与复合材料连接裙直立段筒壁平齐;连接裙上端套装一个加载端框,端框的加载平面与连接裙法兰面贴合,加载端框的上表面与内嵌钢质工装的下表面平行,保证轴压承载试验中复合材料连接裙上载荷施加的均匀性。

利用一个拉伸牵引头,从复合材料连接裙中心通过与复合材料连接裙法兰平面上覆盖的加载端框的中心连接,将均匀施加的拉伸载荷转变为需要的压缩载荷,测试示意图见图5。

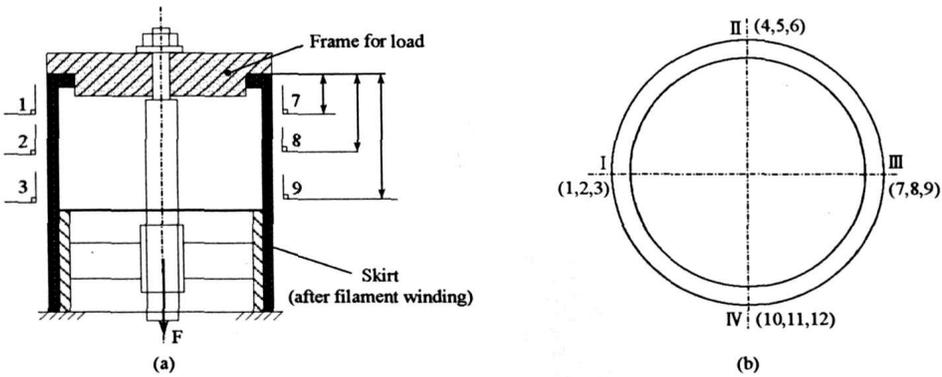


图5 复合材料连接裙轴压试验及应变片的粘贴位置示意图

Fig.5 Position of strain gauges on composites skirt under axis pressure

应变测试的典型部位分别为复合材料连接裙外壁上的三个与法兰面平行的等距离平面,与法兰上平面的距离分别为 H_1, H_2, H_3 (图5(a));同时,将复合材料连接裙裙身的外表面圆周作四等分(图5(b)),每个等分线与三个等距离面相交的位置作为测量点位,粘贴轴向和环向应变片,测量在不断增大的均匀轴压载荷 F 作用下的复合材料连接裙上这些典型位置的轴向应变和环向应变的大小。

静力试验时,轴压载荷按照匀速加载-逐级递增的方式进行(图6)。在 600kN 以前,按照 50kN 的梯度递增,即每次在 5min 内平稳增加 50kN 的载荷,保持 3min,观察裙体无异常现象后再进行下一级加载;600kN 以后,减小加载的梯级递增速度,最终轴压载荷增大到 625.7kN 后,结束试验。

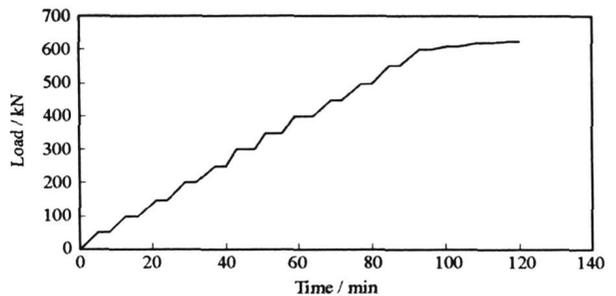


图6 轴压试验加载程序

Fig.6 Loading program in axis pressure test

2 结果与分析

2.1 随炉试件性能

在与复合材料连接裙相同的铺层形式、相同的工艺条件下,采用平板模具制备的复合材料随炉试件的力学性能见表1。

表1 复合材料随炉试件的力学性能
Tab.1 Mechanics properties of composite samples

Lamination type	Tension strength(MPa)	Tension module(GPa)	Bending strength(MPa)	Bending module(GPa)
plain cloth	520	49.5	580	37.2
plain cloth/ unidirectional tap	607	61.3	546	34.7

从表1数据可以看出,添加有单向带铺层的复合材料的拉伸强度提高了16.7%,拉伸模量提高了大约23.8%,这是因为添加了单向带,使得拉伸方向的纤维含量得到了较大幅度的提高,复合材料中多数纤维都处于近似纯受拉状态,能有效地发挥纤维的协同抗拉性能。而在正交织物增强的复合材料中,由于泊松效应引起的横向压缩变形,使纤维束相互挤压变形而破坏界面,引起基体开裂或纤维脱粘,导致拉伸模量和强度的降低^[7]。添加无纬带增强的复合材料试样中,由于大量同向增强纤维的存在,使复合材料在受拉过程当中,纤维和基体的界面可相对较长时间地保持其完整性,也会在一定程度上提高复合材料的拉伸性能。

但是,比较复合材料的弯曲性能后发现,添加高强高模的单向带后,试样的弯曲强度、模量数值不增反降。这是因为本文制备的复合材料试样较厚($> 7\text{mm}$),在试样弯曲性能测试过程中,相当于矩形梁的三点弯曲受力情况,导致中性面上的剪切应力 τ 最大,引起中间层剪切破坏。这种分层破坏一部分是纤维与基体间的界面剥离,另一部分是穿越织物孔洞连接层间基体的铆接树脂断裂。通常纤维与基体的粘结强度较树脂强度低,裂纹很容易沿纤维与基体的界面扩展。而层间铆接面积的增加可提高层合板的抗分层能力^[8]。本文制备的添加有单向带的复合材料试样,单向带纤维细密,且铺放在试样中间,导致层间基体的铆接树脂减少,引起层合板的层间断裂韧性降低,也就导致了复合材料试样的弯曲性能的下降。

2.2 复合材料连接裙的轴压性能

复合材料连接裙各个等距离面上的轴向应变-轴压载荷变化曲线如图7所示,其中6号测点位置处的应变片粘贴不好,造成应变变化异常(图7(c)II),4号测点位置处的应变片在试验过程中脱粘(图7(a)II),脱粘后的应变响应慢。但综合来看,在设计轴压载荷 F 作用下,复合材料连接裙的轴向应变的最大值不到0.1%,远小于0.5%的复合材料许用应变指标,且复合材料连接裙的轴向应变 ε 随着轴压载荷 F 的增加而近似线性增大。比较分析可知, H_1 等距离面上的测点1、4、7、10处的测试值最小,应变水平低,这可能与此位置离法兰转折部位近,结构刚度大,变形小有关; H_2 等距离面上的测点2、5、8、11处的应变测试值最大,这可能是由于该等距离面处于复合材料连接裙直筒段中部,受复合材料连接裙的加载端、固支端的边界条件的影响最小,该等距离面也最能反映出复合材料连接裙轴压承载的真实应力水平; H_3 等距离面(测点3、6、9、12)上的应变值也不大,这可能是由于该等距离面接近复合材料连接裙与内嵌钢质工装的连接部位,复合材料连接裙内部粘接有钢质工装,外部有缠绕纤维补强,变形受到的约束较大。

三个等距离面上的轴向应变-轴压载荷曲线表明,在同一等距离面上圆周的四个等分位置的轴向应变变化趋势基本一致,说明RIM工艺制备的复合材料连接裙制品各等分位置的质量均匀,即由织物铺层卷绕方法制备的碳纤维增强预成型体各部分性能均衡;也就是说,在预成型体制备过程中,每个织物卷绕层的搭接口在复合材料连接裙圆周上错位均匀分布,不会在复合材料连接裙制品的圆周上产生局部薄弱区和应力集中区。

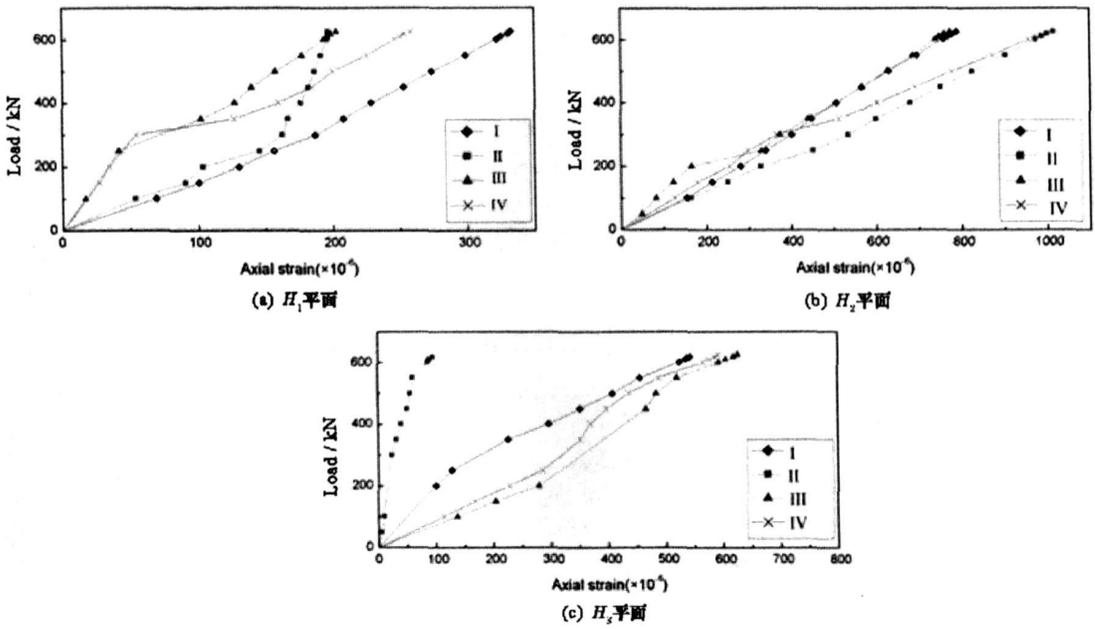


图 7 等距离面上的轴向应变-轴压载荷曲线

Fig. 7 Load vs axial strain curves on equidistant planes of the composites skirt

复合材料连接裙各个等距离面上的环向应变-轴压载荷变化曲线如图 8 所示。环向应变曲线表明:在加载过程中复合材料连接裙的环向应变主要表现为拉伸应变,说明在轴压载荷作用下所测的三个等距离面上的复合材料连接裙裙体呈向外膨胀的变形趋势,同时,复合材料连接裙裙身的平纹布铺层中环向纤维对这种向外膨胀的变形有明显的约束作用,说明复合材料连接裙采用平纹布铺层是合理且必要的。

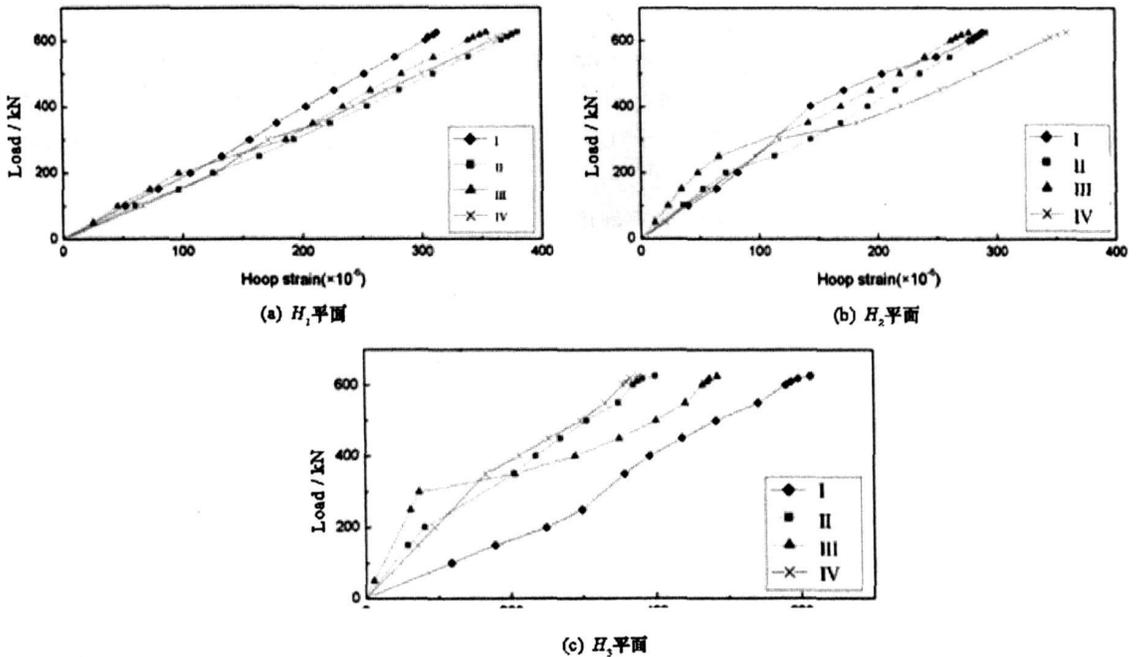


图 8 等距离面上的环向应变-轴压载荷曲线

Fig. 8 Load vs hoop strain curves on equidistant planes of the composites skirt

另外,三个等距离面上各等分位置测点的轴压载荷-环向应变曲线的规律性较好。首先是各测点的轴压载荷-环向应变曲线的线性度好,变化趋势一致;其次表现在相同轴压载荷作用下,同一等距离

面上各等分位置测点的应变测量值大小差别不大,说明本文采用的织物卷绕铺层法制备的预成型体以及在此基础上采用 RTM 工艺制备复合材料连接裙环向质量均匀,裙体结构不存在明显薄弱部位和严重应力集中区。

在同样的名义应力(即相同载荷)条件下,将每个等距离面上四个等分位置测点的轴向应变的测量数据取平均值,其中, H_1 等距离面上,轴压载荷 $\geq 300\text{kN}$ 以后,去除出现异常的 4 号测点的数据,采用其他三个测点的应变数据取平均值; H_3 等距离面上取三个测点,排除出现异常的等分位置 II 处的测量值。由此做出的 VARTM 复合材料连接裙的名义应力-轴向应变曲线如图 9 所示。由于 H_2 等距离面远离法兰拐角和工装连接部位这两个应力集中区,该水平面上的轴向应变-名义应力曲线的线性关系最好,以此曲线的斜率代表 RTM 复合材料连接裙的轴向表观结构刚度。对 H_2 等距离面的轴向应变-名义应力曲线进行线性拟合后,直线斜率为 40900MPa ,可以认为 RTM 工艺制备的复合材料连接裙的轴向表观结构刚度为 40.9GPa 。

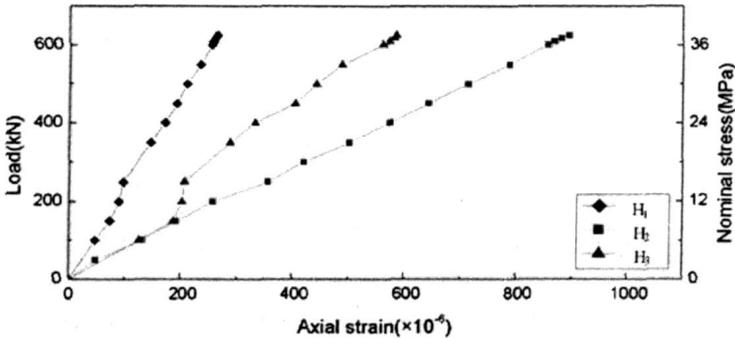


图 9 等距离面上平均轴向应变-名义应力曲线

Fig. 9 Nominal stress vs axial strain curves on equidistant planes of the composite skirt

3 结论

采用碳纤维织物卷绕制备出复合材料连接裙纤维增强预成型体,在此基础上采用 CYD-128 环氧树脂 RTM 注射制备出整体复合材料连接裙。制备的复合材料连接裙在设计的轴压载荷 F 作用下,连接裙的轴向应变的最大值不到 0.1% ,远小于 0.5% 的复合材料许用应变指标,连接裙的轴向表观结构刚度为 40.9GPa 。

采用 RTM 工艺制备的复合材料连接裙质量均匀,裙体结构不存在明显薄弱部位和严重应力集中区。

参考文献:

- [1] Evans R P. Composite Motor Case Design. Design Methods in Solid Rocket Motors[R]. AD- A199356, 1988.
- [2] 李超, 邱哲明, 刘建超. 用混编布带缠绕薄壁圆筒的研究[J]. 纤维复合材料, 2003(3): 40- 43.
- [3] 刘建超, 左仓, 高克洲. 固体火箭发动机复合裙成型工艺研究[J]. 固体火箭技术, 2001, 24(1): 64- 67.
- [4] 尹昌平, 张明龙, 刘钧, 等. 硅橡胶气囊辅助 RTM 工艺成型复合材料裙段研究[J]. 材料工程, 2006(sup. 1): 290- 293.
- [5] 郭恩明. 结构复合材料应用现状与发展趋势[C]// 第十四届全国复合材料学术会议论文集, 2006: 18- 27.
- [6] 彭超义, 肖加余, 等. 整体复合裙的铺层比优化设计与轴压性能分析[J]. 固体火箭技术, 2006, 29(3): 208- 211.
- [7] 杨朝坤. 编织结构复合材料力学性能的测试与分析[J]. 玻璃钢 复合材料, 2002(3): 11- 14.
- [8] 高峰, 姚穆. 复合材料层间基体铆接与层间剪切强度的关系[J]. 西北纺织工学院学报, 2001, 15(2): 269- 274.