

混杂纤维复合材料壳体承外载试验*

王明鉴, 何洪庆, 虞 健

(西北工业大学 航天工程学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 为了解决固体发动机承外载荷能力和质量系数的矛盾, 用 F12纤维、S-2玻璃纤维及二者的混杂纤维缠绕成三种壳体试件, 对壳体试件分别进行了扭矩试验和轴压试验。通过试验获得了三种壳体试件的扭矩和轴压破坏形貌和破坏载荷, 并测得了相应质量。结果表明, 混杂纤维缠绕壳体能有效地使发动机承外载荷能力和质量系数得到协调。

关键词: 固体推进剂火箭发动机; 载荷; 质量; 壳体; 载荷试验

中图分类号: V435.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2005) 01-0093-04

Study on outer loading about interweaved fibers composite case by experiments

WANG Ming-jian, HE Hong-qing, YU Jian

(Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract To solve the contradiction between capability of bearing outer loading and mass coefficient in solid rocket motor, three kinds of cases were made differently with F12 fiber/4304 epoxy, S-2 glass fiber/4304 epoxy and their interweave fibers /4304 epoxy. By the torsion and axial compression experiments, the shearing and axial compression properties of the three kinds of cases were obtained, and their weight was measured at the same time. The results indicate that by using interweave fibers composite case, capability of bearing outer loading and request of mass coefficient can be met in solid rocket motors at one time.

Key words Solid propellant rocket engine; Load; Mass; Shell; Load test

1 引 言

随着新材料的发展和固体发动机设计技术的提高, 混杂纤维复合材料在高性能战略、战术导弹发动机壳体中得到了越来越广泛的应用。混杂纤维复合材料是指两种或两种以上纤维增强一种或多种树脂基体的复合材料, 它兼顾了强度、刚度、韧性及质量等特性, 克服了单一纤维复合材料的弱点, 实现了综合性能的优化。纤维增强材料主要有 S-2 玻璃纤维、F12 纤维、Kevlar-49 纤维和碳纤维等^[1]。

国外非常重视混杂纤维复合材料的研究和应用, 20 世纪 70 年代中期美国在 Sprint 导弹发动机壳体上采用了 Kevlar-49、碳纤维混杂复合材料, 使发动机的刚度和抗弯、抗压能力明显得到提高^[1]; 20 世纪 80

年代美国研制的高速拦截导弹 Sentry 发动机壳体采用了 Kevlar-49/CF 混杂复合材料, 使壳体爆破压强达到 41.8 MPa^[2]。此外, 美国在战略导弹发射筒、发动机裙部也采用了混杂纤维复合材料。

国内在单一纤维复合材料的研究方面取得了突破, F12 纤维、S-2 玻璃纤维复合材料已经得到了应用。但是, 对混杂纤维复合材料的研究起步较晚, 还处于基本性能探索阶段^[1]。

目前, 在工程应用中, 采用单一 S-2 或单一 F12 纤维复合材料, 遇到了发动机质量系数和承外载能力难以协调的矛盾。本文分别对单一 F12 纤维、单一 S-2 玻璃纤维、F12/S-2 混杂纤维复合材料圆柱壳体模拟试验件进行扭转力矩和轴压试验, 通过结构试验研究获得单一和混杂纤维复合材料壳体的抗外载荷

* 收稿日期: 2004-04-05; 修订日期: 2004-10-09。

作者简介: 王明鉴 (1963—), 男, 博士生, 高级工程师, 研究领域为固体火箭发动机。

性能,为工程设计提供依据。

壳体稳定性理论指出,对于园柱壳体轴压下的失稳计算,经典线性理论的预测值与实验值有很大的偏差,实验值仅有理论预测值的 15% 到 60%。即使采用非线性大挠度理论和初始后屈曲理论的数学模型进行分析计算,也与壳体的轴压实验值存在较大误差^[3 4]。纤维复合材料作为各向异性材料,其壳体的强度、刚度、抗外载荷能力不仅取决于纤维的性能,还与基体材料的性能、缠绕张力、铺层次序、基体与纤维界面的粘接以及工艺等因素有关^[5 6]。因此,与理论计算相比,就纤维复合材料的工程应用而言,结构试验研究更具有实用价值。

2 材料基本性能及试验件制作方案

S-2玻璃纤维、F12纤维的基本力学性能见表 1。

Table 1 Mechanical properties of the fibre materials		
Properties	S-2 glass fibre	F12 fibre
Tensile strength/MPa	3100	4900
Comparative density/(g/cm ³)	2.49	1.45
Broken elongation/%	5.7	3.5

基体材料均选用 4304环氧树脂, S-2玻璃纤维、F12纤维复合材料的基本性能见表 2。

Table 2 Mechanical properties of fibre/base composite materials			
Properties	S-2 glass fibre/4304 epoxy	F12 fibre/4304 epoxy	Remark
Compress strength in length/MPa	530	241	Unilateral plank
Compress strength in breadth/MPa	165	105	Unilateral plank
Shearing strength in length and breadth/MPa	150	49	Crossing plank
ILSS/MPa	43	21	NOL loop
Tensile strength/MPa	2000	2300	NOL loop

试验件基体材料为 4304 环氧树脂,直径为 200mm 圆筒,铺层方式为纵向 8 层 /0°,环向 13 层 /90°交替对称铺放,缠绕顺序为

[0₁ /90₁ /0₁ /90₁ /0₁ /90₁ /0₁ /90₁ /0₂ /90₁ /0₂ /90₁ /0₂ /90₁ /0₂ /90₁ /0₁]

S-2玻璃纤维、F12纤维、混杂纤维三种试件的基体材料、直径、铺层方式、缠绕顺序均相同。混杂纤维试件纵向为 S-2玻璃纤维,环向为 F12纤维。每种试件 3 个子样,质量均值 F12纤维试件为 1.6kg 混杂纤维试件为 2.1kg S-2纤维试件为 2.6kg。

3 试验结果及破坏形貌

试验前,将 F12纤维试验件编为 A 类,试件子样编号为 A₁, A₂, A₃, S-2玻璃纤维试验件编为 B 类,试件子样编号为 B₁, B₂, B₃, 混杂纤维试验件编为 AB 类,试件子样编号为 AB₁, AB₂, AB₃。

扭矩试验中, A 类试件和 AB 类试件的破坏形式均为筒段环向纤维部分扭断,此时测得了破坏载荷。由于试验装置设计的最大量程为 50kN·m, B 类试件实测 50.3kN·m 时仍未破坏,但试件轴向纤维与轴向已呈现明显夹角。

扭矩试验结果见表 3,破坏形貌照片见图 1(A, B, C)。

Table 3 Results of torsion experimentation									
Type	A			AB			B		
Number	A ₁	A ₂	A ₃	AB ₁	AB ₂	AB ₃	B ₁	B ₂	B ₃
Max load/(kN·m)	27.4	20.0	19.8	27.8	30.2	23.3	50.3	50.3	50.3
Average/(kN·m)	20.4			27.1			50.3		

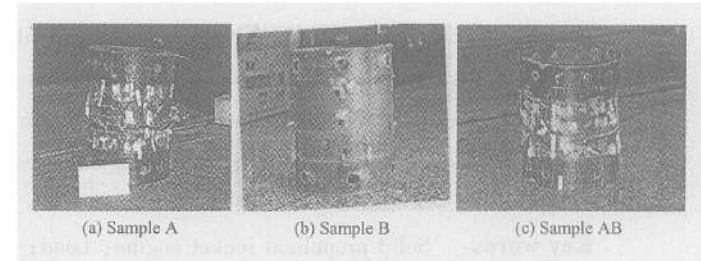


Fig 1 Photos of samples after torsion experimentation

轴压试验中,三种试件的破坏形式均为园筒局部纵向纤维折断,环向纤维分层、松脱,此时测得轴压破坏载荷。根据圆筒试件的平均壁厚和轴压破坏载荷的均值可以计算出压缩强度。

轴压试验结果见表 4,破坏形貌照片见图 2(A, B, C)。

Table 4 Results of axial compression experimentation									
Type	A			AB			B		
Number	A ₁	A ₂	A ₃	AB ₁	AB ₂	AB ₃	B ₁	B ₂	B ₃
Max load/kN	260.7	363.2	271.8	636.7	629.5	636.7	945.8	1067.0	1141.0
Average/kN	298.6			634.3			1051.3		
Compress strength/MPa	88			195			335		

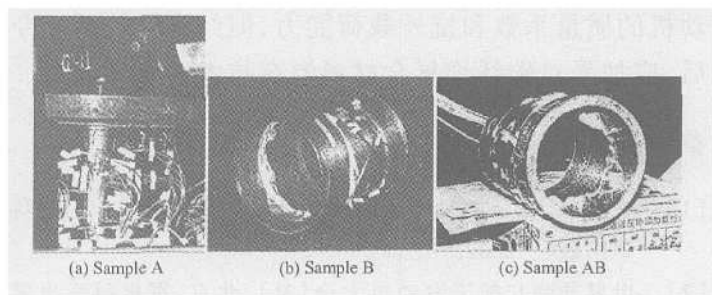


Fig 2 Photos of samples after axial compression experiment

4 试验结果分析

4.1 扭矩试验结果

纤维缠绕壳体为层合结构, 扭矩试验是考核纤维复合材料在壳体结构条件下的抗剪切能力, 了解纤维层间混杂复合材料对壳体承扭矩能力的增益效果。从扭矩试验结果看, 混杂试件的扭矩破坏载荷 $27.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 介于单一 F12 纤维试件破坏载荷 $20.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 和单一 S-2 玻璃纤维试件破坏载荷 $50.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 之间, 符合混杂纤维复合材料的混合定律, 而且表现为正的混杂效应。

从宏观力学的观点看, 试验件扭矩破坏的原因是随着扭矩载荷的增加壳体内部剪切应力增加、应变增大。当扭矩加载到一定值时, 壳体局部应变产生突变, 尤其是局部环向应变迅速增大, 当应变达到一定值时局部环向纤维断裂, 导致整个结构破坏。这一现象也可以从纤维复合材料的宏观力学性能得到解释。从正交板的性能看, S-2 玻璃纤维复合材料的纵横剪切强度 150 MPa , F12 纤维复合材料的纵横剪切强度 49 MPa , 二者相差 3 倍。从 NOL 环性能看, S-2 玻璃纤维复合材料的层间剪切强度 43 MPa , F12 纤维复合材料的层间剪切强度 21 MPa , 二者相差 2 倍。试验件的缠绕方式为纵向铺层和环相缠绕, 其结构形式为正交异性薄壁圆柱壳体, 该结构受到扭矩作用时, 其受力状态与正交板的剪切状态类似, S-2 试件的扭矩破坏载荷是 F12 试件的 2.5 倍, 混杂试件的扭矩破坏载荷是 F12 试件的 1.3 倍, 表明壳体结构的破坏载荷主要取决于纤维复合材料的纵横剪切强度和层间剪切强度。

从细观力学的观点分析, 一方面, 纤维复合材料基体中存在原始缺陷, 即原始微裂纹, 当试件剪切应力增加时, 微裂纹将逐渐扩展, 当损伤累积达到一定程度时, 基体发生开裂。另一方面, 由于纤维的破坏应变比基体的破坏应变大得多, 当外载荷增大到某一值时, 纤维/基体界面或附近将脱粘, 形成微裂纹, 随

载荷增大微裂纹迅速扩展。上述两种情况都将导致应力集中, 随着载荷的增加, 应力集中处的纤维应变突增、逐步发生断裂。在此破坏过程中, 断裂纤维和完整纤维之间的界面将发生剪切屈服或分层, 并逐步扩展直至最终破坏^[1]。F12 纤维与 S-2 玻璃纤维相比断裂伸长率低而刚性差, 试件受扭时纤维易拉断而受压时更易于变形失稳, 产生应力集中, 从而在较低的应力下出现裂纹, 导致基体开裂、分层和纤维断裂。当两种纤维混杂后, S-2 在一定程度上弥补了 F12 纤维的弱点, 减缓了局部变形和应力集中, 对裂纹扩展起到了抑制作用。

4.2 轴压试验结果

轴压试验结果表明, 混杂试件的轴压破坏载荷 634.3 kN , 介于单一 F12 纤维试件破坏载荷 298.6 kN 和单一 S-2 玻璃纤维试件破坏载荷 1051.3 kN 复合材料之间, 符合混杂纤维复合材料的混合定律, 而且表现为正的混杂效应。

从轴压试验情况看, 三种试件均为局部纵向纤维断裂, 环向纤维分层、松脱, 这说明随着轴压载荷的增加, 壳体出现了应力集中, 从而导致局部应变增大, 尤其是纵向应变迅速增加, 直至纵向纤维断裂。

F12 纤维与 S-2 玻璃纤维复合材料相比, 压缩强度较差, 当然与碳纤维相比差得就更多了。这是因为 F12 纤维复合材料受压时, 当压缩应变大约在 0.6% 时, 应变曲线将出现拐点, 经过拐点后压缩模量下降很大, 随着应力增加, 应变迅速成倍增加。从拉伸、压缩应力应变曲线看, 碳纤维复合材料的拉压力学行为几乎相同, 而 F12 纤维复合材料的拉压力学行为却相差巨大, S-2 玻璃纤维复合材料的拉压力学行为明显优于 F12 纤维复合材料。从表 1、表 2 也可以看出, S-2 玻璃纤维复合材料纵向压缩强度是 F12 纤维复合材料的 2 倍多, 横向压缩强度是 F12 纤维复合材料的 1.6 倍。

从细观力学观点分析, 裂纹的产生、扩展, 界面之间的脱粘、分层, 其机理与扭矩试验分析类似。但与扭矩试验破坏模式不同, 轴压试验时, 随轴压载荷增大局部纵向纤维开始屈曲, 导致出现微裂纹, 损伤累积到一定程度时应变突增, 纵向纤维破坏、基体分层、环向纤维松脱。破坏过程中, 局部纤维屈曲是主导因素, 层间剪切是次要因素。

此外, S-2 玻璃纤维试件的轴压破坏载荷是 F12 纤维试件的 3.5 倍, 混杂试件的轴压破坏载荷是 F12 纤维试件的 2.1 倍 (表 4), 其增益明显大于扭矩破坏载荷的值 (分别为 2.5 倍和 1.3 倍, 表 3)。这一方面说

明, S-2玻璃纤维试件的抗轴压性能比抗剪切性能更突出;另一方面说明, 轴压载荷主要是由纵向纤维承担, 混杂试件的纵向纤维采用 S-2玻璃纤维, 环向纤维保持 F12纤维不变, 试件整体能显著提高抗轴压能力。

5 结 论

(1)与 F12单一纤维复合材料壳体相比, 混杂纤维复合材料壳体的抗外载荷能力明显增强。

在使用同一种基体材料 4304环氧树脂, 采用同样的缠绕工艺条件下, 将 8层纵向铺层由 F12纤维改为 S-2玻璃纤维, 混杂壳体的扭矩破坏载荷增加 33% (表 3), 轴压破坏载荷增加 112% (表 4)。

(2)混杂纤维复合材料壳体与 F12单一纤维复合材料壳体相比, 消极质量增加了 31%, 但与 S-2单一玻璃纤维复合材料壳体相比, 却降低了 24%。

可见, 采用 F12纤维与 S-2玻璃纤维复合材料混杂技术可以有效地兼顾发动机的质量系数和抗外载荷指标, 实现发动机综合性能的优化。

(3)由于碳纤维的抗压缩性能更优, 且质量更轻, 采用碳纤维的混杂复合材料更有利于提高导弹发

动机的质量系数和抗外载荷能力, 但经济性较差。今后, 应加强对碳纤维复合材料混杂技术的研究。

参考文献:

- [1] 曾庆敦. 复合材料的细观破坏机制与强度 [M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [2] 世界导弹与航天发动机大全 [M]. 北京: 军事科学出版社, 1999
- [3] 吴连元. 板壳稳定性理论 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996
- [4] Meshkov E. Investigation of the mechanical characteristics of unidirectional composites at static loading [J]. *Mech. Composite Mater.*, 1991, 27: 459~467.
- [5] Mao R J Williams F W. Nonlinear analysis of cross-ply thick cylindrical shells under axial compression [J]. *Int J. Solids Structures*, 1998, 35(17).
- [6] Dongyao Tan. Torsional buckling analysis of thin and thick shells of revolution [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2000, 37: 3035~3078

(编辑: 梅 瑛)

(上接第 71 页)

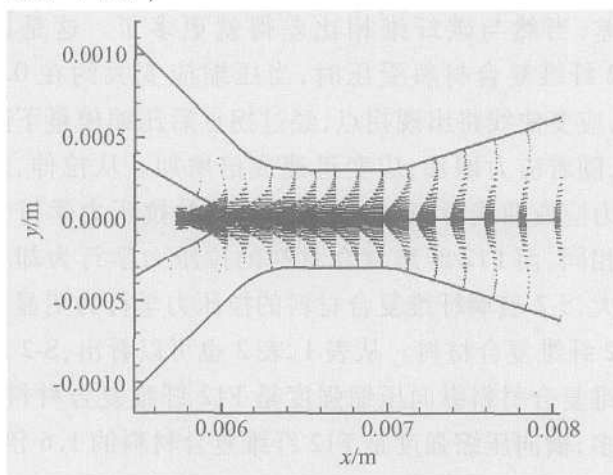


Fig 4 Current density vector

有限控制容积积分方法对控制方程进行离散, 并成功采用 9 种不同迭代方法对离散方程进行迭代求解。研究表明, Gauss-Seidel 逐线超松弛迭代法具有很快的收敛速度, 同时也具有很高的最终收敛精度和迭代过程稳定性, 是求解 Arcjet 流动区域电磁场离散方程的一种快速有效的方法, 将其应用于 Arcjet 全场耦合数值模拟能够获得较高的计算效率。本文 Arcjet 流动区域电磁场的数值解法对电磁流体电磁

场的数值求解具有广泛的参考意义。

参考文献:

- [1] 廖宏图, 吴铭岚, 汪南豪. 电弧喷射器流场模拟中电场计算的多重网格法 [J]. 推进技术, 1999, 20(5). (LIAO Hong-tu, WU Ming-lan, WANG Nan-hao. Calculation of electric field using multigrid method in numerical simulation of arcjet flow field [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1999, 20(5).)
- [2] 肖应超, 汤海滨. 电弧等离子体发动机数值仿真计算研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003
- [3] 杨显清, 赵家升, 王 园. 电磁场与电磁波 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003
- [4] 陈 重, 崔正勤. 电磁场理论基础 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2003
- [5] 吴 季等译. 电磁波理论 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003
- [6] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
- [7] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988
- [8] 颜庆津. 数值分析 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000

(编辑: 梅 瑛)