

# 三维编织圆管力学性能及火箭级间段模拟结构承载能力研究\*

沈怀荣

(国防科工委指挥技术学院 北京)

郑文龙

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

**摘要** 对于三维四向(4D)和五向(5D)两种编织碳/环氧圆管构件及由其组成的火箭模拟级间段,测试其压缩和扭转力学性能及轴压承载能力。实验表明,5D材料的压缩性能比4D材料有较大幅度提高,剪切模量提高幅度不明显。用3—细胞模型和FGM模型预测相应的力学性能和压缩强度,并与实验结果进行了比较。结果表明,3—细胞模型的结果与实验结果符合较好,FGM模拟预测结果偏低。本文结果为编织结构的设计分析提供了依据。

**关键词** 三维编织, 压缩, 扭转, 强度

**分类号** TU 599

## Investigation on Mechanical Properties for Three-dimensional Braided Circular Tubes and the Bearing Capacities for the Analogue Structure of a Rocket Linking-Stage

Shen Huairong

(Institute of Command and Technology Beijing)

Zheng Wenglong

(Department of Aeronautics, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract** The compression and torsion behavior for the three-dimensional braided C/E 4-D and 5-D circular tubes and the axial compression bearing-capacity for the Analogue Structure of Rocket Link-stage were investigated by experimental method in this paper. The experimental results show that the compression behavior for 5-D material is superior to 4-D material but the shear modulus for 5-D specimens are nearly the same with 4-D ones. The 3-cell model and FGM model are applied to predict the relative properties and compression strength of the tubes. The comparisons between the theoretical results and the experimental ones indicate that the predict results by 3-cell model are fairly coincident with the experiments, and the predict values by FGM model are lower. The results in this paper are a good basis for the designer of the braid structures.

**Key words** three-dimensional braid, compression, torsion, strength

三维异型整体编织结构复合材料是80年代国外首先发展起来的新型结构复合材料。该种复合材料除保持普通层合复合材料比模量大、比强度高和可设计性好等优点外,还从根本上克服了普通复合材料层间和层中强度低,抗断裂损伤、剪切和冲击能力差的缺点。由于这种先进的复合材料可以不分层而整体地制成各种异型结构件,不需要机械加工、可预埋接头、容易安装连接,因而在航天、航空、机械、体育、高层建筑、军事等领域得到了广泛应用<sup>[1,2]</sup>。相应的力学行为的分析模型也得到了发展,如纤维倾角模型<sup>[3]</sup>、应变能方法<sup>[4]</sup>、空间结构叠加法<sup>[5]</sup>、纤维几何模型(FGM)<sup>[6]</sup>、三细胞模型(3-Cell)<sup>[7]</sup>及均匀化方法<sup>[8]</sup>等。

对于三维编织复合材料力学性能的实验研究也受到了相应的重视<sup>[9-15]</sup>。这些研究为建立和验证分

\* 1998年4月5日收稿

第一作者: 沈怀荣,男,1954年生,教授

析模型、进行结构设计和应用奠定了良好的基础。圆管构件是工程中常用的基本结构件之一，可用此构件组合成空间结构件，如火箭的连接级间段，卫星的柔性太阳能电池帆板等。在结构设计和分析时，首先必须掌握其力学行为。目前，有关三维 4D 和 5D 整体编织的圆管构件力学性能的研究成果报导较少。本文给出国产三维碳/环氧整体编织圆管构件的压缩、扭转力学行为和圆管构件组成的模拟火箭级间段结构的实验研究结果，并与理论预测结果进行了比较。

### 1 试件结构与实验方法

所有的圆管构件均采用四步整体编织和 RTM 成型工艺完成。所采用的增强材料为 T 300 (12K) 碳纤维，基体材料为 TDE85 环氧树脂。圆管编织纱线的分布为  $48 \times 6$ 。其编织参数为：编织角  $\theta = 58.8^\circ$ ；方位角  $\beta = 45^\circ$ ；三维整体编织 4D 圆管试件的尺寸为  $250 \times 38 \times 4\text{mm}$ ，5D 圆管试件尺寸为  $250 \times 36 \times 3\text{mm}$ 。

压缩试验时，用 4D 圆管试件 4 根，5D 圆管试件 3 根。试件两端适当加强，置于 WD-200B 电子万能试验机两夹头之间，轴向加载。用双弓平均引伸计测定标距段的变形。标距段长度  $l_0 = 50\text{mm}$ 。加载速度为  $2\text{mm/min}$ ，平均试验温度为  $T = 25.5$ ，相对湿度  $\text{RH} = 51\%$ 。

扭转实验时，用 4D 和 5D 圆管试件各 3 根，标距  $L_0 = 100\text{mm}$ 。实验装置为 50 型扭力试验机（青山试验机厂）。根据扭转试验机夹头的形式，在圆管两端分别加配金属接头，然后将接头在试验机夹头上夹紧进行扭转实验。由扭转实验，可确定圆管的剪切模量。试件承受的扭矩通过扭矩传感器测得。为了测定试件标距段内的扭转变形，设计了一套专门的变形测量装置。其原理是：通过测定试件标距段两端截面上的相对位移而转换得到剪切模量。

火箭级间段模拟件是由 16 根圆管组成的直径为 0.5m 的圆桶形空间桁架结构。结构两端为刚性金属盖板，以模拟火箭的法兰盘结构。级间段模拟结构的展开图如图 1 所示。4D 和 5D 试验件各制造了两件。轴压试验是在 YE-200A 液压式压力试验机上进行的。试验前对试验机进行了载荷标定。试验过程中由结构件圆管上的应变片监视结构的变形。

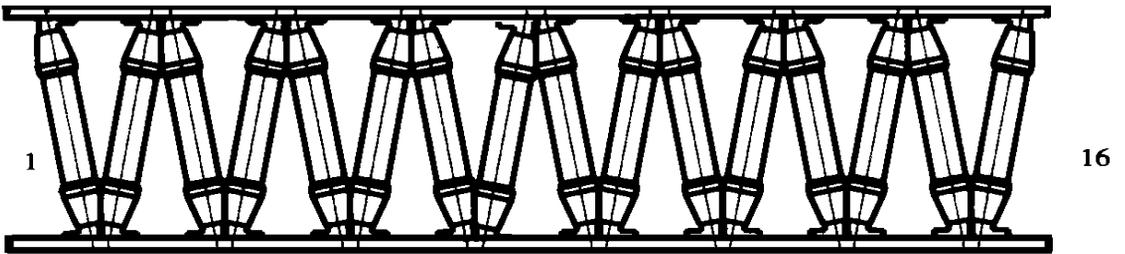


图 1 火箭级间段模拟结构展开图

Fig. 1 Schematic for the rocket link-stage analogue structure

图 2 至图 5 分别示出 4D 和 5D 圆管试件的压缩应力—应变曲线和典型曲线。测试结果列于表 1 中。

由三维整体编织 4D 和 5D 圆管构件的压缩性能比较可知，5D 圆管的压缩模量和压缩强度都高于组分材料相同的 4D 圆管。但与相应的矩形截面试件相比，低于矩形截面试件的纵向压缩模量，高于矩形截面试件的横向压缩模量；压缩强度小于矩形截面试件的压缩强度。

表 1 圆管结构件试验结果

Tab. 1 Experimental results of circular tubes

性能	压缩模量	剪切模量	强度
	GPa	GPa	MPa
4D 试件	17.0	16.0	125
5D 试件	30.8	17.8	184.8

图 6 至图 7 示出一个典型的级间段模拟

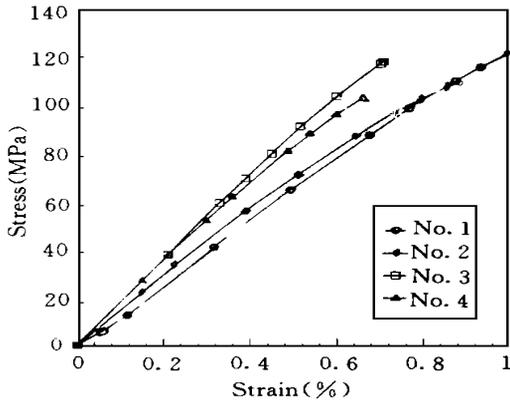


图 2 4D 圆管压缩应力-应变曲线

Fig. 2 Compressive stress versus the strain for 4-D circular tubes

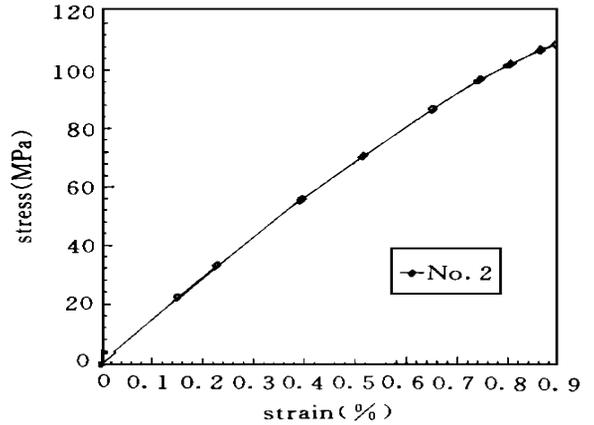


图 3 4D 圆管压缩应力-应变典型曲线

Fig. 3 The typical compressive stress-strain curve of 4-D circular tubes

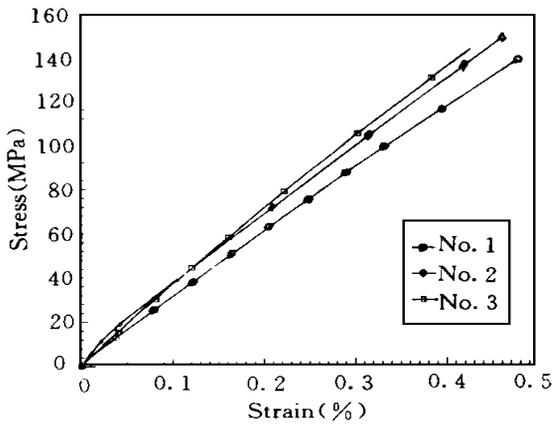


图 4 5D 圆管压缩应力-应变曲线

Fig. 4 Compressive stress versus the strain for 5-D circular tubes

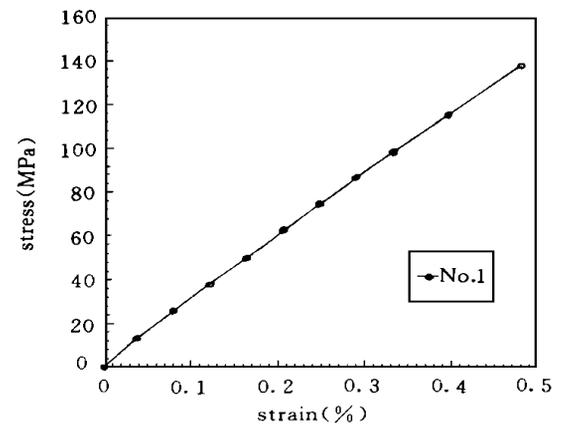


图 5 5D 圆管压缩应力-应变典型曲线

Fig. 5 the typical compressive stress-strain curve of 5-D circular tubes

件在轴压试验中各圆管的应力—变形曲线。4D1 号试件的破坏载荷为 700kN，2 号试件的破坏载荷为 820kN，5D1 号试件的破坏载荷为 753kN，5D2 号试件的破坏载荷为 800kN。虽然 4D 和 5D 试件的承载相当，但是 5D 试件各圆管的厚度为 3mm，比 4D 材料节约四分之一。

## 2 理论分析及与实验结果的比较

分析编织复合材料的力学性能的方法较多，其中 3-细胞模型和 FGM 方法是目前使用较多的方法。3-细胞模型与 FGM<sup>[6]</sup>方法相比较，除了保留体元的概念外，还客观地考虑了面元和柱元的影响。本文进一步推广 3-细胞模型来预测三维编织复合材料的强度。3-细胞模型计算总刚矩阵的基本公式为：

$$[C] = \sum_i k_i [C_i] \quad i = B, F, R$$

其中  $i$  为各类细胞单元的类型， $B$  代表体元数目， $F$  代表面元数目， $R$  代表柱元数目。 $k_i$  表示各类细胞的体积含量比。 $[C]$  为三维整体编织复合材料的总刚度矩阵， $[C_i]$  为相应类的单元细胞在总体坐标系下的刚度矩阵。如果  $F = 0$  和  $R = 0$ ，则 3-细胞模型蜕变为 FGM 模型。由总刚矩阵求逆，即可得到总柔度矩阵  $[S]$ 。从而，由总柔度矩阵可以容易地得到工程弹性常数。同样，在作强度预测时，也同样考虑了面元和柱元的影响。在计算中，作为初步分析，采用纤维束破断应变处的应变能作为强度判据，即：

$$U = \frac{\{\sigma\}\{\epsilon\}^T}{2} U_M$$

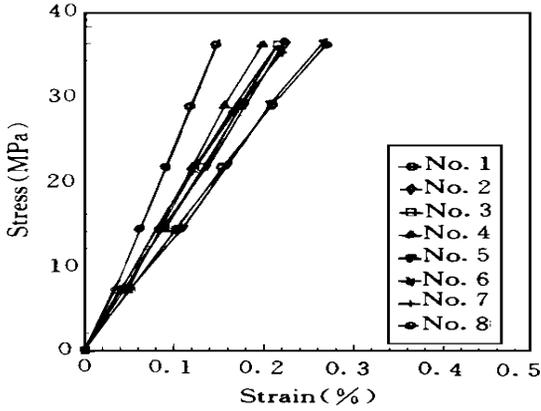


图6 1-8管应力-应变曲线

Fig. 6 stress-strain curve of Tube 1-8

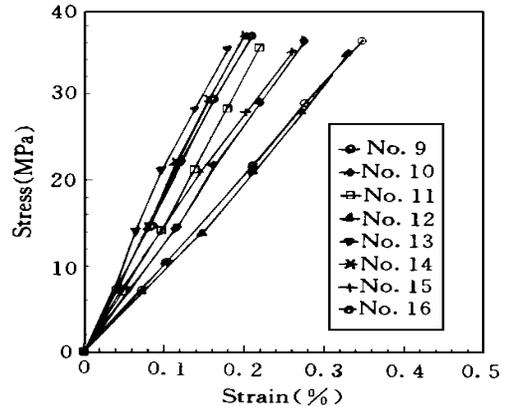


图7 9-16管应力-应变曲线

Fig. 7 stress-strain curve of Tube 9-16

$$U_M = \frac{E_{f1}\epsilon_b^2}{2}V_f + (1 - V_f)E_m \frac{\epsilon_b^2}{2}$$

其中  $E_n$  和  $E_m$  分别表示纤维的弹性模量和基体的弹性模量;  $V_f$  表示纤维体积分数;  $\epsilon_b$  表示纤维的破断应变。

表2给出分别用3-Cell模型和FGM模型进行理论预测的结果和实验结果比较。其中5D编织复合材料的纤维体积分数为  $V_f = 60\%$ 。各类单元数分别为:  $B = 120, F = 48, R = 0$ 。5D材料增加的编织轴方向的纤维束数目为115。

根据加工工艺实验和测算,纤维束的编织损伤  $D = 10\%$ ,基体空隙率  $\alpha = 1\%$ 。在理论计算时,按损伤力学原理对纤维的弹性模量进行了折减。所用组分材料的力学性能如下:

纤维性能  $E_{f1} = 221\text{GPa}$   $E_{f2} = 20\text{GPa}$   $G_{f12} = 49.6\text{GPa}$

$\nu_{12} = 0.22$   $\nu_{23} = 0.31$

基体性能  $E_m = 3.92\text{GPa}$   $\nu_m = 0.34$

表2 理论与实验结果比较

Table 2 comparison between theoretical computations and experiments

性能	4D 编织圆管试件			5D 编织圆管试件		
	实验	3Cell 预测	FGM 预测	实验	3Cell 预测	FGM 预测
$E_1$ (GPa)	17.0	18.0	9.6	30.8	31.8	21.7
$E_2$ (GPa)		12.9	11.6		15.1	14.7
$E_3$ (GPa)		11.3	11.6		14.4	14.7
$G_{12}$ (GPa)		12.0	13.9		13.3	15.4
$G_{13}$ (GPa)	16.0	15.8	13.9	17.8	17.4	15.4
$G_{23}$ (GPa)		14.9	17.7		16.4	19.2
$\nu_{12}$		0.17	0.33		0.18	0.32
$\nu_{13}$		0.56	0.33		0.52	0.32
$\nu_{23}$		0.55	0.48		0.55	0.55
$\sigma_b$ (MPa)	125	122	79.6	184.8	180.5	131

### 3 结论

由理论预测结果与实验结果,可得出如下结论:

- (1) 进行了4D与5D两种整体编织圆管构件压缩和扭转力学行为实验研究,实验方法合理可靠。
- (2) 实验结果表明,5D整体编织复合材料圆管构件的压缩力学性能比4D构件有较大幅度的提高,剪切模量无明显提高。5D材料的模拟级间段比4D材料轴压承载能力高25%。

(3) 理论预测与实验结果比较表明, 3-细胞模型预测的工程弹性常数和强度结果, 与实验结果比较吻合, 而FGM模型预测结果偏低。

### 参考文献

- 1 Frank K. Ko and Christopher M. Pastore. Structure and Properties of an Integrated 3-D Fabric for Structural Composites. Recent Advances in Composites in the United States and Japan, ASTM STP 864 1985: 428~439
- 2 裘镜蓉. 编织复合材料在宇航上的应用. 宇航材料工艺, 1991, (4)
- 3 Jenn-Ming Yang, Chang-Long Ma and Tsu-Wei Chou. Fiber Inclination Model of Three-dimensional Textile Structural Composites. Journal of Composite Materials, 1986, 20: 472-484
- 4 Chang Long Ma, Jenn Ming Yang and Tsu Wei Chou. Elastic Stiffness of Three-dimensional Braided Textile Structural Composites. Composite Materials: Testing and Design (Seventh Conference). ASTM STP 893, 1986: 404-421
- 5 王力兵. 三维编织碳/碳复合材料力学性能, 长沙: 国防科技大学 [博士论文], 1988
- 6 F K Ko. Three-dimensional Fabrics for Composites In Textile Structural Composites, Edby Tsu-Wei Chou and Frank K. Ko, ELSEVIER, 1989: 129~172
- 7 D L Wu. Three-cell Model and 5D Braided Structural Composites. Composite Science and Technology (56) 1996: 1-8
- 8 刘书田, 陈耿东. 复合材料应力分析的均匀化方法. 力学学报, 1997, 29 (3): 306~313
- 9 A B Macander, R M Crane and E T Jr. Camponeschi. Fabrication and Mechanical Properties of Multidimensionally (X-D) Braided Composite Materials. Composite Materials, ASTM STP893, 1986: 422~443
- 10 S S Yav, T W Chou, Frank K. Ko. Flexural and Axial Compressive Failures of Three-dimensionally Braided Composite I-beams, Composites, 17, (3): 227~232
- 11 燕瑛. 纺织结构复合材料强度性能的研究. 北京航空航天大学学报, 1996, 27 (6), 707-771
- 12 黎观生. 三维编织复合材料拉伸性能试验研究. 材料工程, 1997, (6): 20~21, 41
- 13 秋雁. 碳/碳复合材料室温力学性能测试. 航天返回与遥感, 1996, 17 (4): 50~57, 63
- 14 Tang Wen-Biao, Shen Huai-Rong. Mechanical Properties of C/E Three-dimensional Braid Structural Composites. Pro. of IMMM '95, International Academic Publishers, 1995. 8: 233~238
- 15 沈怀荣, 郑文龙等. 碳/环氧三维五向编织结构复合材料力学性能测试报告. 国防科技大学航天技术系, 1996