

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202601001

三维编织复合材料结构多尺度力学特性

罗海波^{1, 2}, 王 谦², 杨燕初^{2*}, 郭 军², 李 涛², 冯 涛¹, 何小辉², 龚文韬²

(1. 海南空天信息研究院 海南省地球观测重点实验室, 海南 文昌 571300;

2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094)

摘 要: 为了给临近空间工程应用提供依据, 对三维编织预埋刺辊连接圆管结构进行了力学性能探索。首先, 对三维编织单胞细观结构进行设计和分析, 得到弹性模量和泊松比等基本力学参数。然后, 对三维五向(3D5D)编织预埋刺辊连接复合材料圆管进行拉伸和压缩力学性能测试, 分析影响承载力学性能的结构设计参数, 讨论编织角、编织厚度和编织构型对圆管承载能力的影响因素。最后, 通过损伤形貌分析圆管结构的失效机制, 并利用扫描电镜观测并分析微观结构损伤机理。结果表明: 在同样外径情况下, 3D5D 编织比三维全五向编织的拉伸失效载荷大; 在同样编织构型和外径情况下, 圆管壁越厚, 压缩失效载荷越大。 $\phi 30t3$ -C 圆管获得了最大的压缩失效载荷, 损伤形貌表现为刺辊接头滑脱失效; $\phi 30t2.5$ -T 和 $\phi 25t3$ -T 圆管均获得了较大的拉伸失效载荷, 平均超过 120 kN, 失效形貌表现为刺辊接头拉脱与圆管端部纤维胀裂; $\phi 30t3$ -T 圆管拉伸平均失效载荷超过 105 kN。研究结果可为临近空间浮空器结构轻质高强承载设计和飞行应用提供重要的科学依据。

关键词: 三维编织复合材料; 细观结构; 预埋连接; 力学性能; 损伤分析

中图分类号: TB331

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2026)01-0001-09

三维编织复合材料具有质量稳定、抗疲劳、低热膨胀、比强度和比刚度较高等优异的综合力学性能^[1-4], 已逐渐被应用于临近空间领域等航空航天和国防工业关键领域。然而, 含预埋体三维编织复合材料的连接性能在临近空间浮空器结构系统上的应用仍处于未知状态, 尤其是在临近空间极端环境下的损伤演化和失效机制尚不明确。因此, 三维编织预埋连接复合材料轻质高强连接设计及其关键技术在临近空间领域^[5-6]及其他领域^[7-8]的应用亟待探索和突破。

研究三维编织复合材料的损伤机理和失效机制对临近空间浮空器结构系统实现轻量化设计至关重要。一些学者对三维编织复合材料进行了试验研究和有限元失效机制分析^[9-15]。Zuo 等^[16]研究

了三维五向(3D5D)编织复合材料在不同温度下的纵向压缩疲劳性能。Gideon 等^[17]证明了编织角对三维编织圆管的动态失效机制影响巨大。Fang 等^[18]通过多尺度耦合方法展示了三维编织复合材料梁结构在弯曲载荷作用下的渐进损伤行为。Li 等^[19]对高应变率压缩特性进行了试验研究, 并证明了动态渐进失效机制。Zuo 等^[20]研究了在高温条件下不同编织角度对复合材料的渐进失效机制的影响。Shi 等^[21]研究了三维四向和五向编织复合材料的多尺度失效机制以及在热氧化条件下的冲击断裂行为, 发现老化后其性能显著下降。Liu 等^[22-23]改进了 3D5D 编织复合材料细观代表性体积单元, 并对拉伸-拉伸疲劳失效机制进行了全面的试验研究。Ge 等^[24]分析了孔隙缺陷对 3D5D 编织

收稿日期: 2025-04-08

修回日期: 2025-09-08

录用日期: 2025-09-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12572399); 国家自然科学基金青年基金 C 类项目(12402206);

海南省自然科学基金面上项目(523MS115); 国家重点研发计划项目(2022YFB390180502, 2022YFB3901805)

第一作者: 罗海波(1985—), 男, 副研究员, 主要从事临近空间浮空器总体研发与应用研究。E-mail: luohb@aircas.ac.cn

***通信作者:** 杨燕初(1982—), 男, 研究员, 主要从事临近空间科学与应用技术研究。E-mail: yangyanchu@aoe.ac.cn

引用格式: 罗海波, 王谦, 杨燕初, 等. 三维编织复合材料结构多尺度力学特性[J]. 火箭军工程大学学报, 2026, 40(1): 1-9.
LUO Haibo, WANG Qian, YANG Yanchu, et al. Multi-scale mechanical properties of three-dimensional braided composite structures [J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2026, 40(1): 1-9.

复合材料弹性常数的影响。Tian 等^[25]从理论上研究了三维多向编织复合材料双轴拉伸和压缩渐进损伤以及失效机制。

本研究对 3D5D 编织预埋刺辊连接复合材料圆管结构的拉伸和压缩力学行为及失效机理进行探索。首先,从细观层面进行基本力学性能预测,得到基本力学参数,作为宏观输入参考;其次,从宏观层面进行轻质高强设计并评估其承载力学性能。从宏观和微观角度观察了断口形貌,并对失效机理进行了讨论。对反映其承载能力的载荷-位移曲线进行分析,对影响其承载能力的几何结构参数、编织构型和固化工艺进行优化设计和评估分析,综合评估其微观和宏观失效形貌和损伤机制。研究结果可为临近空间浮空器结构系统三维编织复合材料轻量化高强连接设计^[26]和飞行应用提供测试数据和科学依据。

1 力学分析

1.1 细观单胞建立

由于三维多向编织复合材料的微观几何结构较复杂,本研究基于对代表性体积单元进行的细观尺度力学分析,并基于试验观察的扫描电子显微照片建立纱线的几何模型^[27]。本研究建立的细观单胞基于以下假设:1) 编织纱线和轴向纱线在相互挤压变形后的截面分别为六边形和四边形;2) 所有相邻的纱线保持完整的接触,纱线和基体也保持理想的相互结合。代表性体积单胞如图 1 所示,其几何尺寸为 $2a \times 2a \times h$ 。其中, $2a$ 为胞体边长, h 为花节高度。编织纱线和轴向纱线的空间拓扑关系通过 θ 和 α 来确定,其中, θ 为编织纱线中心轴与 z 轴间的夹角, α 为编织角。

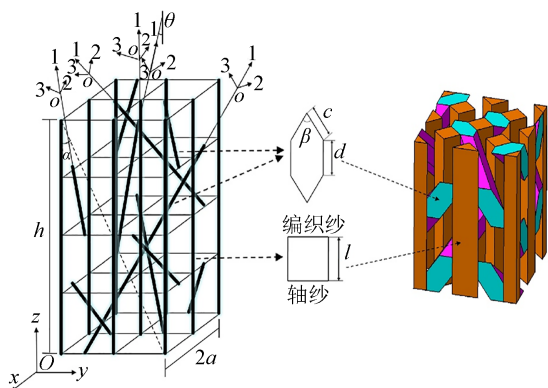


图 1 代表性三维多向编织单胞示意

Fig. 1 Schematic of a representative three-dimensional multi-directional braided unit cell

θ 和 α 的相互关系为 $\tan \theta = \sqrt{2} \tan \alpha$, 轴向纱线边长 l 定义为

$$l = \sqrt{N_1 \pi \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 / \varepsilon} \quad (1)$$

式中: N_1 为轴向单丝的数量; ϕ 为纤维单丝的直径; ε 为纱线的比例填充因子。

基于重复单胞假设, 三维编织代表性体积单元的纤维含量可以确定为

$$c^2 \sin \beta + 2dc \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) = N \pi \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 / \varepsilon, \quad \varepsilon = V_f / V, \quad V = A_f / A_c \quad (2)$$

式中: V_f 为纤维体积含量; V 为纱线的体积比例; A_f 和 A_c 分别为轴向纱线和编织复合材料的横截面积; N 为编织单丝的数量; β 为六边形编织纱线的锐角; d 为编织纱线的短边长; c 为编织纱线的长边长。

编织纱线和轴向纱线截面参数可定义为

$$\beta = 2 \arcsin \frac{1}{1 + \cos^2 \theta}, \quad h = \frac{2\sqrt{2}a}{\tan \theta}, \quad c = \frac{\sqrt{2}a - 2l}{4 \sin(\beta/2)}, \quad d = \frac{a}{\sin(\alpha/2) \sqrt{\tan^2(\theta/2) + 1}} - \frac{\sqrt{2}a - 2l}{2 \tan(\beta/2)} \quad (3)$$

三维编织代表性体积单胞参数化模型可通过 CATIA 建立。

1.2 细观单胞数值模拟和讨论

为了更好地表征四向纱线在剪切载荷作用下的受力情况, 在 3D5D 单胞模型的基础上增加六向和七向纱线, 并对其进行仿真模拟分析。将 α 设为 45° , 选择在 xOy 平面上受到 1% 剪切应变来讨论其力学行为, 得到单胞模型在剪切条件下的应力分布情况, 如图 2 所示。

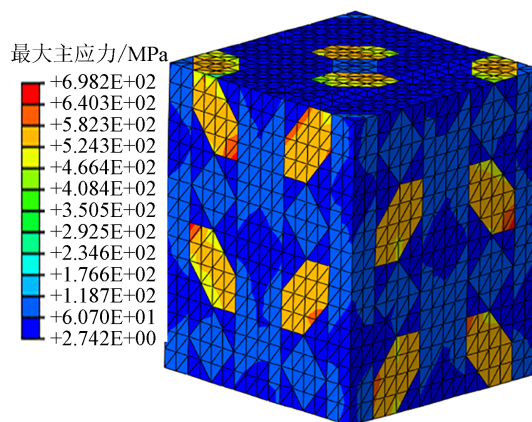


图 2 三维多向编织单胞剪切载荷应力分布

Fig. 2 Stress distribution under shear load on a three-dimensional multi-directional braided unit cell

图 3 展示了三维多向编织单胞主纱和基体应力

分布情况, 可以看出, 在面内剪切变形条件下, 主要受载的是四向纱线, 且四向纱线的应力较大, 最大为 698.2 MPa, 而基体的应力相对较小, 其最大应力不超过 60 MPa, 且最大应力发生在纱线和基体结合的部位, 很可能是由于基体和纱线挤压产生应力集中引起的。

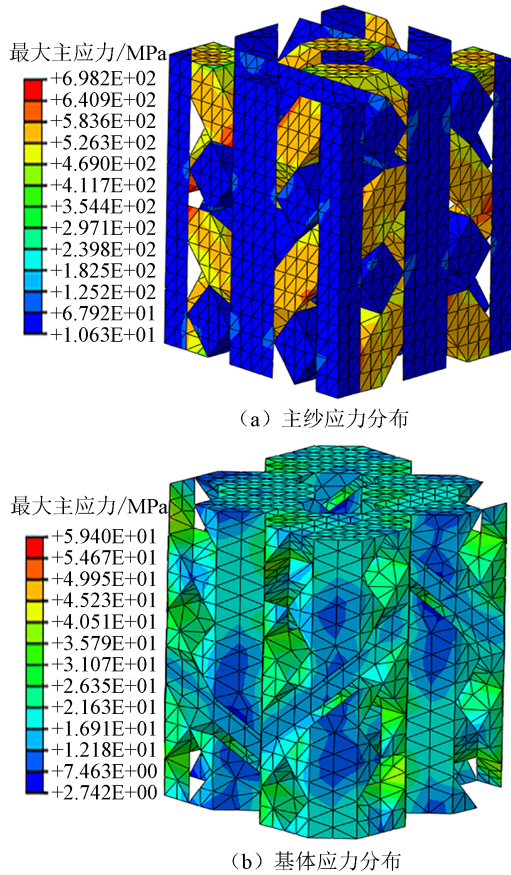


图3 三维多向编织单元主纱和基体应力分布

Fig. 3 Stress distribution of the main yarn and matrix of a three-dimensional multi-directional braided unit cell

考虑到宏观圆管结构常采用3D5D编织构型, 主要对3D5D单元的细观力学参数弹性模量、剪切模量和泊松比进行模拟分析和讨论。3D5D编织单元可被认为是横观各向同性材料, 其弹性常数随着编织角度的增加的变化趋势, 纤维体积含量对弹性性能的影响如图4所示。从图4(a)可以看出, 轴向弹性模量 E_z 随着编织角度的增加有明显降低, 却随着纤维体积分含量的增加而增加; 当纱线的编织角度较大时, 纤维体积分含量对 E_z 的影响相对较大。从图4(b)可以看出, 横向弹性模量 E_x ($E_x = E_y$) 随着编织角度的增加而稳步增加; 与 E_z 类似, E_x 和 E_y 也随着纤维体积分含量的增加而增加。

图5展示了3D5D编织单元剪切模量的变化趋

势。从图5(a)可以看出, 横向剪切模量 G_{xy} 随着编织角度的增加而单调增加, 增长率随着编织角度的增大而逐渐增大; 随着纤维体积分含量的增加, 剪切模量 G_{xy} 也单调增加。此外, 当编织角度较大时, 随着纤维体积分含量的增加, G_{xy} 的变化相对更明显。从图5(b)可以看出, 当编织角度小于 45° 时, 纵向剪切模量 G_{zx} 和 G_{zy} 随着编织角度的增大稳步增加; 当编织角度为 45° 时, G_{zx} 和 G_{zy} 达到最大值; 当编织角度大于 45° 时, G_{zx} 和 G_{zy} 随着编织角度的增大而逐渐减小。另外, 当纤维体积分含量较大时, 其整体的剪切模量更大。

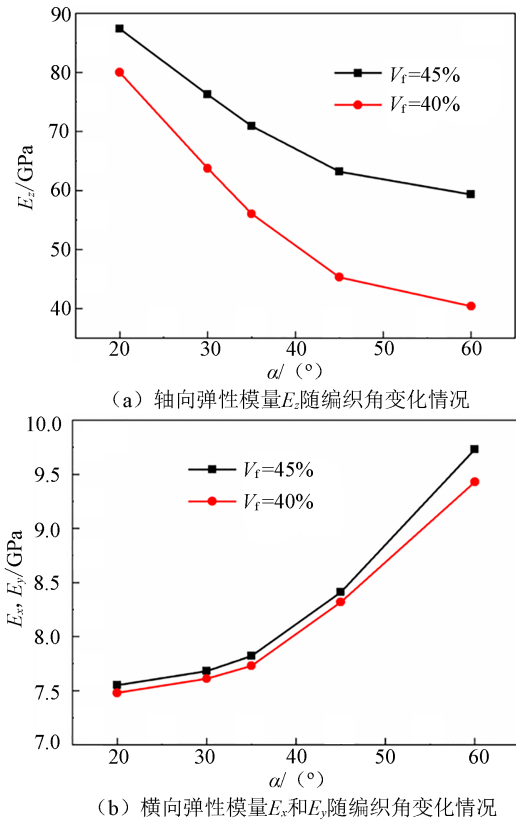


图4 3D5D编织单元弹性模量变化趋势

Fig. 4 Trends of elastic modulus variations of a 3D5D braided unit cell

3D5D编织单元泊松比随编织角变化的演化趋势如图6所示。从图6(a)可以看出, 随着编织角度的增大, 横向泊松比 ν_{xy} 逐渐增大; 当编织角度小于 45° 时, 纤维体积分含量越大, 可以获得更大的 ν_{xy} ; 而当编织角度大于 45° 时, 纤维体积分含量越大, 可获得的 ν_{xy} 越小。纵向泊松比变化趋势如图6(b)所示, 随着编织角度的增加, ν_{zx} 和 ν_{zy} 先增大后减小; 当编织角度等于 35° 时, 纵向泊松比取得最大值。此外, 纤维体积分含量越小, 其整体泊松比越大。

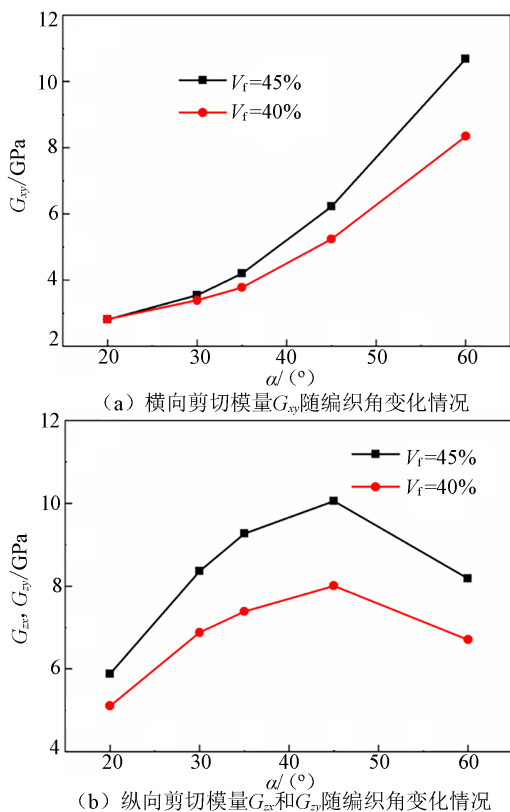


图 5 3D5D 编织单胞剪切模量变化趋势

Fig. 5 Trends of shear modulus variations of a 3D5D braided unit cell

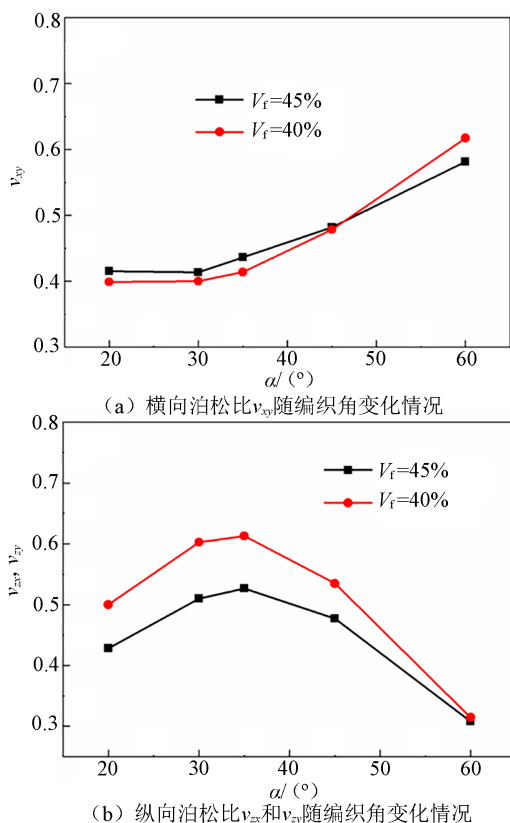


图 6 3D5D 编织单胞泊松比变化趋势

Fig. 6 Trends of Poisson's ratio variations of a 3D5D braided unit cell

2 宏观力学试验分析

以细观参数作为宏观设计的基本参考,在宏观设计中,综合考虑结构轴向性能和横向性能的实际受力工况,将编织角为 20° 编织结构的弹性性能作为重点参考,综合考虑对应的体积分数和强度参数进行编织管工艺设计制作,并制备得到对应的三维编织预埋刺辊连接复合材料圆管结构件。

2.1 材料和试验件准备

三维编织预埋刺辊复合材料圆管试样的整体长度为 400 mm,外径为 25 mm 或 30 mm,编织角度为 20° ,编织厚度为 2.5 mm 或 3 mm,编织构型为 3D5D,钛合金刺辊的长度为 46 mm,定义沿着圆管轴向方向为纤维的 0° 方向。三维编织预埋刺辊连接复合材料圆管代表性试样几何结构如图 7 所示,刺辊预埋在圆管的两个端部,同批次测试包含 2 个重复的测试试样。

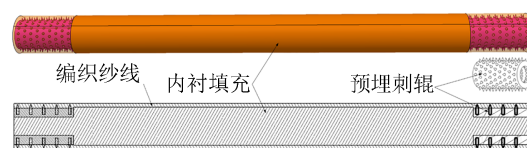


图 7 三维编织预埋刺辊圆管几何结构

Fig. 7 Geometric structure of a 3D braided pre-embedded licker-in connecting tubular

试验件的生产过程如下。首先,将含预埋刺辊的三维编织预制体放入半圆形钢制模具,钢制模具的内径比圆管试验件的外径大 0.2 mm 左右,有效长度比圆管试验件的长度长 0.2 mm 左右。放入预制体前,在模具的内表面涂覆脱模剂,连续涂覆 3 次,每次间隔 30 s。随后,通过螺钉将两块半圆形钢制模具紧固连接在一起,将预制体包裹在固化所需的内部空腔内,通过在模具空腔中注入 JL-235 环氧树脂实施固化操作。通过高压持续注入环氧树脂,使树脂与纤维束充分浸润。整个固化过程通过 RTM 成型工艺实现,并通过热压罐高温高压固化成型。固化过程中,先 25°C 保持 1 h,后加压同时加温到 180°C 并保持 2 h,最后降压并降温到 25°C 。最终,制造得到外径为 30 mm 或 25 mm,壁厚为 2.5 mm 或 3 mm 的 4 种类型三维编织预埋连接圆管标准试验件。

2.2 三维编织圆管材料

三维编织圆管试验件材料主要包含 T700 碳纤维、TC4 钛合金和 JL-235 环氧树脂。在拉伸和压缩测试过程中,采用单一变量法分别研究编织角、编织构型、编织厚度和预埋刺辊尺寸对力学性能

的影响。拉伸试验采用 4 种试验件，分别是 $\phi 30t3-T$ 、 $\phi 30t2.5-T$ 、 $\phi 25t3-T$ 、 $\phi 25t2.5-T$ ；压缩试验也采用 4 种试验件，分别是 $\phi 30t3-C$ 、 $\phi 30t2.5-C$ 、 $\phi 25t3-C$ 、 $\phi 25t2.5-C$ 。以上试件的尺寸规格如表 1 所示。

表 1 试验件尺寸规格
Table 1 Dimensions of test pieces

试件类型	圆管直径/ mm	刺辊直径/ mm	填充直径/ mm	编织构型
$\phi 30t3-T$	30	23	24	3D5D
$\phi 30t2.5-T$	30	24	25	3D5D
$\phi 25t3-T$	25	18	19	3D5D
$\phi 25t2.5-T$	25	19	20	3D5D
$\phi 30t3-C$	30	23	24	3D5D
$\phi 30t2.5-C$	30	24	25	3D5D
$\phi 25t3-C$	25	18	19	3D5D
$\phi 25t2.5-C$	25	19	20	3D5D

2.3 试验准备

拉伸及压缩试验分别在 50 t MTS 拉力试验机 和 25 t 压缩试验机上进行，所有试验件的测试环境条件均为常温常压。通过试验，分别获得拉伸、压缩载荷-位移曲线，得到最大拉伸破坏与最大压缩破坏载荷；同时，获取试验件的拉伸破坏与压缩破坏形貌，并对其失效形貌进行微观损伤分析。试验过程均采用位移控制加载模式，加载速率为 2 mm/min，相关测试数据由计算机采集并进行后期处理。

3 试验结果及讨论

3.1 三维编织圆管失效行为分析

在拉伸试验中，不同外径和壁厚的圆管表现出不同的破坏形式，其代表性的渐进失效典型破坏形貌特征如下。 $\phi 30t2.5-T$ 、 $\phi 25t3-T$ 和 $\phi 25t2.5-T$ 试验件的破坏形式均为金属刺辊接头拉脱破坏，且伴随有编织管的端部撕裂破坏，钛合金刺辊的针刺从编织圆管撕裂的缝隙中滑出。随着拉力的逐渐增大，刺辊端部的针刺承受的横向和纵向剪切力逐渐增大，同时，针尖对针刺的根部还产生了较大的弯矩作用；当针刺与编织纤维的接触力达到极限状态时，针刺尖端产生明显的弯曲现象；随着拉力的进一步增大，刺辊端部的 16 颗针刺与编织管失去接触力，产生拉脱破坏，直至编织圆

管最终发生撕裂损伤，从而失去承载能力。但 $\phi 30t3-T$ 试验件的破坏形式为金属刺辊接头拉断破坏，金属刺辊的针刺并未从圆管的端部拉出，圆管端部也保持完好，并未发生撕裂现象。这很可能是由于刺辊采用空心圆管设计，其本身的承载强度小于预埋连接的强度导致的。

在压缩试验中，其代表性的渐进压溃失效破坏形式如下。 $\phi 30t3-C$ 试验件的破坏形式是刺辊接头滑脱导致复合材料圆管破坏，刺辊的端部与编织管结合处发生了明显的纤维胀裂损伤。随着压力的逐渐增大，刺辊端部的针刺承受的剪切力和弯曲力逐渐增大，且针尖对针刺的根部产生了较大的弯矩作用；当针刺与编织纤维的压溃接触力达到极限状态，且超过编织纱线所能承受的最大压应力时，编织圆管与针刺接触的四周出现明显的胀裂和挤压损伤形貌，同时伴随着圆管胀裂现象；随着压力进一步增大，圆管失去整体承载能力，最终发生压溃失效。

但 $\phi 30t2.5-C$ 、 $\phi 25t3-C$ 和 $\phi 25t2.5-C$ 试验件的破坏形式主要表现为编织圆管压溃失效。圆管端部将金属刺辊包络部分所形成的包络体并未发生损伤，而是形成了一个良好的整体，包络体也未出现圆管胀裂现象。随着加载载荷逐渐增大，包络体与管壁壁厚变化处最先发生挤压损伤，编织纱线隆起并发生弯折，在圆管轴向上形成 45° 断裂带，同时，在圆管环向形成不规则断裂带，随着载荷进一步增大，纱线发生剪切和弯曲损伤后产生断裂，直至最终失去承载能力。

综上所述可知，拉伸状态下，主要发生刺辊接头拉脱失效和拉断失效；压缩状态下，主要发生刺辊接头滑脱失效和圆管压溃失效。

3.2 载荷-位移曲线

3D5D 编织圆管试验件在拉伸状态下的载荷-位移曲线如图 8 所示。每类试验件的载荷-位移曲线基本都遵循 3 个阶段演化趋势：1) 初始拉伸阶段，拉伸载荷由 0 缓慢增加到 4 kN，拉伸位移达到 0.8 mm；载荷值保持在 4 kN 低水平状态，直到拉伸位移增加到 2 mm，载荷仍然保持不变，此阶段为刺辊针刺与编织纱拉伸接触阶段；2) 随着拉伸位移增加，载荷也逐渐增加，载荷-位移曲线表现为非线性增长状态，圆管的拉伸刚度逐渐增大，过程中能听到刺辊针刺与编织纱产生接触力所发出的吱吱声响；拉伸位移达到 6 mm 时，载荷-位移曲线表现为线性增长状态；随着拉伸载荷逐渐

增大,所有试验件的拉伸载荷均突破 80 kN,拉伸位移均超过 9 mm,此过程中,通过编织纱将承载能力传递给刺辊上的若干针刺,满足多点弯曲承载设计要求;3)随着拉伸位移继续增大,刺辊针刺与编织纱线的剪切力和弯曲应力持续增大,并伴随有较大的嘭嘭声响;破坏载荷达到极限时,刺辊发生拉脱失效或断裂失效,最终失去承载能力。试验结果表明, $\phi 30t3-T$ 和 $\phi 25t3-T$ 圆管拉伸平均载荷均超过 120 kN,且最大拉伸载荷为 130.16 kN。这是由于 $\phi 30t3-T$ 钛合金接头采用空心管设计,而 $\phi 30t2.5-T$ 与 $\phi 25t3-T$ 采用实心管设计,而拉伸载荷强度取决于接头的强度,所以 $\phi 30t2.5-T$ 与 $\phi 25t3-T$ 的载荷更大。

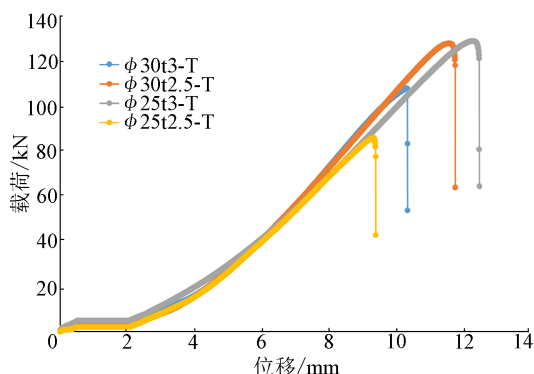


图 8 拉伸载荷-位移曲线

Fig. 8 Curves of tensile load-displacement

3D5D 编织圆管试验件在压缩状态下的载荷-位移曲线如图 9 所示。每类试件的压缩载荷-位移曲线同样遵循 3 个阶段的演化趋势:1)初始压缩阶段,载荷缓慢增加,压缩刚度逐渐增大,压缩位移达到 1 mm 时,压缩刚度基本维持不变,且压缩载荷不超过 30 kN,此阶段为刺辊针刺与编织纱压缩接触阶段;2)随着载荷增加,压缩位移逐渐增加,载荷-位移曲线几乎表现为线性增长状态,圆管的压缩刚度基本维持不变,此过程中能清晰听到刺辊针刺与编织纱压缩接触所发出的挤压声响;3)随着压缩位移继续增大,刺辊针刺与编织纱线的剪切力和弯曲应力持续增大;压缩破坏载荷达到极限时,刺辊接头突然发生滑脱失效或编织管压溃失效,并伴随着纱线严重挤压撕裂现象,此过程中能清晰听到较大的坍塌声响,最终失去承载能力。试验结果表明, $\phi 30t3-C$ 圆管获得了较大的压缩平均载荷,且最大压缩载荷为 93.93 kN。

对比压缩试验与拉伸试验可知,拉伸试验的平均破坏载荷均大于压缩试验的破坏载荷,且拉伸破坏位移均大于 9 mm,这对浮空器在放飞过程

中较大冲击过载下的碳纤维承力结构设计具有参考意义;而压缩破坏位移不超过 4 mm,但最低压缩破坏承载能力大于 60 kN,满足临近空间浮空器飞行试验工程应用要求。

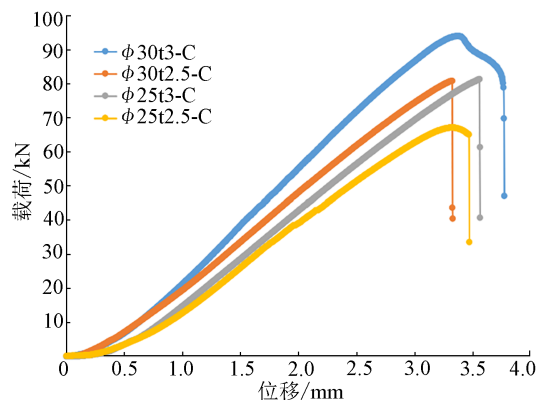


图 9 压缩载荷-位移曲线

Fig. 9 Curves of compression load-displacement

3.3 损伤分析

对 $\phi 30t2.5-T$ 试验件拉伸失效后的微观损伤形貌进行了观测,其纱线断口形貌如图 10 所示。纱线中的若干碳纤维丝束呈现不规则断裂形貌,断口处均呈现圆形断裂面。一些区域纤维拔出后呈现较大的凹坑,断裂纤维束整体呈错位分布形态。一些区域呈现单根纤维束从树脂基体中拔出的形貌,基体与纤维束相互挤压后脱粘并形成不规则的裂缝。以上微观角度典型损伤形貌可为宏观损伤判断提供参考,从而为三维编织预埋连接优化设计提供指导。

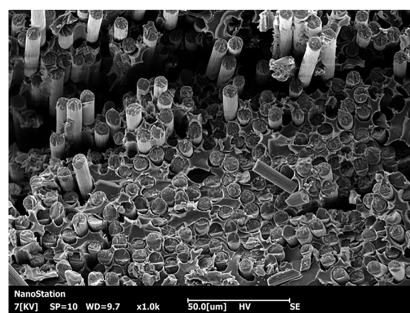


图 10 纱线断口形貌

Fig. 10 Fracture morphology of yarns

4 结论

本研究对 3D5D 编织细观单胞的力学性能进行了分析,获得了弹性模量、剪切模量和泊松比等基本力学参数,并对其影响因素进行了讨论;建立了三维编织预埋连接圆管结构设计方法,开展

了拉伸和压缩力学性能测试, 获得了宏观圆管结构轴向承载能力、载荷-位移曲线、最大失效载荷, 并对不同加载条件下的失效形貌进行了分析讨论, 为后续3D5D编织预埋连接圆管结构优化设计提供了重要参考依据, 主要结论如下。

1) 对于3D5D编织单胞, 随着编织角增大, 其轴向弹性模量相应减少, 而横向弹性模量相应增加; 但是纤维体积含量对不同模量的影响一致, 均是纤维体积含量越大, 模量越大。

2) 拉伸条件下, 编织管的微观损伤形貌主要表现为编织纱中的碳纤维丝束拉断破坏, 同时纱线表现为明显的撕裂破坏; 局部区域表现为碳纤维丝束从树脂基体中拔出, 且树脂基体间由于挤压和剪切力的作用发生位错断裂。微观典型损伤行为可以为编织管宏观失效和高强连接优化设计提供指导。

3) $\phi 30t2.5-T$ 和 $\phi 25t3-T$ 圆管均获得了较大的失效载荷, 拉伸平均载荷超过 120 kN, 其最大拉伸载荷为 130.16 kN; $\phi 30t3-C$ 圆管获得了最大的压缩平均载荷, 其最大压缩载荷为 93.93 kN。以上均满足临近空间浮空器极端环境下的轻质高强长航时服役工程应用需求。

本研究获得了3D5D编织预埋连接圆管结构的宏观力学性能关键参数, 但是其结构设计还需要持续优化, 其轴向力学性能还有待进一步提升, 还需在扭转和疲劳性能方面开展更深入的研究, 以便后续用于临近空间大尺度重载结构系统。

参考文献

- [1] XU K, QIAN X M. Analytical prediction of the elastic properties of 3D braided composites based on a new multiunit cell model with consideration of yarn distortion[J]. *Mechanics of Materials*, 2016, 92: 139-154.
- [2] ZHOU H L, PAN Z X, et al. Experimental and numerical investigation of the transverse impact damage and deformation of 3-D circular braided composite tubes from meso-structure approach[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 86: 243-253.
- [3] 张超, 许希武, 毛春见. 三维编织复合材料渐进损伤模拟及强度预测[J]. *复合材料学报*, 2011, 28(2): 222-230.
ZHANG C, XU X W, MAO C J. Progressive damage simulation and strength prediction of 3D braided composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, 28(2): 222-230.
- [4] 杨志贤, 张明, 李昂, 等. 含孔隙缺陷三维五向编织复合材料偏轴拉伸力学性能分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2022, 48(4): 569-577.
YANG Z X, ZHANG M, LI A, et al. Offaxis tensile mechanical properties of 3D five-directional braided composites with void defects[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2022, 48(4): 569-577.
- [5] 顾逸东. 从高空气球到载人航天[J]. *现代物理知识*, 2023, 35(S1): 192-199.
- [6] 顾逸东. 关于空间科学发展的一些思考[J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(8): 1031-1049.
GU Y D. Thoughts on space science development [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(8): 1031-1049.
- [7] 杜善义. 工程科学与科技强国[J]. *科技导报*, 2020, 38(10): 41-43.
- [8] 汪民乐. 国家战略安全态势分析研究综述[J]. *火箭军工程大学学报*, 2023, 37(1): 1-9.
WANG M L. Overview of national strategic security situation analysis[J]. *Journal of Rocket Force University of Engineering*, 2023, 37(1): 1-9.
- [9] LI S J, ZOU S, DAI L Y, et al. Damage mechanism of carbon-fiber-reinforced-plastic pipe based on reverse and forward curvature drilling[J]. *Composite Structures*, 2022, 292: 115700.
- [10] ZHU H, DU X B, LI D S, et al. Investigation of parameterized braiding parameters and loading directions on compressive behavior and failure mechanism of 3D four-directional braided composites [J]. *Composite Structures*, 2022, 287: 115357.
- [11] 武鲜艳. 三维编织复合材料圆管轴向冲击压缩破坏微观结构和温度效应[D]. 上海: 东华大学, 2017: 122.
WU X Y. Microstructure and temperature effects on axial impact compressive damage of 3-D braided composite circular tubes[D]. Shanghai: Donghua University, 2017: 122.
- [12] 刘晓东. 含减纱三维五向编织复合材料拉-拉疲劳渐进损伤和失效研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022: 120.
LIU X D. Progressive damage and failure of three-dimensional five-directional braided composites with yarn-reduction under tension-tension fatigue loading [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022: 120.
- [13] LI D S, YANG Y, JIANG L. Experimental study on the fabrication, high-temperature properties and failure analysis of 3D seven-directional braided composites under compression[J]. *Composite Structures*, 2021, 268: 113934.

- [14] 陈威, 邓飙, 曹大志, 等. 一种高抗力复合材料结构模型的抗侵彻性能仿真分析[J]. 火箭军工程大学学报, 2023, 37(2): 34-40.
- CHEN W, DENG B, CAO D Z, et al. Simulation analysis of penetration resistance performance of a high resistance composite material structural model[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2023, 37(2): 34-40.
- [15] 王心怡, 罗发, 巩学慧, 等. C/C 复合材料表面低红外发射率薄膜研究[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38(5): 88-95.
- WANG X Y, LUO F, GONG X H, et al. Study of low infrared emissivity films on the surface of C/C composite[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2024, 38(5): 88-95.
- [16] ZUO H M, LI D S, JIANG L, et al. Longitudinal compression fatigue properties of 3D five-directional braided composites at different temperatures[J]. Composite Structures, 2022, 291: 15602.
- [17] GIDEON R K, SUN B Z, GU B H. Mechanical behaviors of four-step 1×1 braided carbon/epoxy three-dimensional composite tubes under axial compression loading[J]. Polymer Composites, 2016, 37(11): 3210-3218.
- [18] FANG G D, WANG B, LIANG J. A coupled FE-FFT multiscale method for progressive damage analysis of 3D braided composite beam under bending load[J]. Composites Science and Technology, 2019, 181: 107691.
- [19] LI D S, LU Z X, JIANG N, et al. High strain rate behavior and failure mechanism of three-dimensional five-directional carbon/phenolic braided composites under transverse compression[J]. Composites Part B: Engineering, 2011, 42(2): 309-317.
- [20] ZUO H M, LI D S, JIANG L. High temperature mechanical response and failure analysis of 3D five-directional braided composites with different braiding angles[J]. Materials, 2019, 12(21): 3506.
- [21] SHI B H, ZHANG M, LIU S K, et al. Multi-scale ageing mechanisms of 3D four directional and five directional braided composites' impact fracture behaviors under thermo-oxidative environment[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 155: 50-65.
- [22] LIU X D, ZHANG D T, SUN J, et al. Refine reconstruction and verification of meso-scale modeling of three-dimensional five-directional braided composites from X-ray computed tomography data [J]. Composite Structures, 2020, 245: 112347.
- [23] LIU X D, ZHANG D T, QIU H P, et al. On-axis fatigue behaviors and failure characterization of 3D5D braided composites with yarn-reduction using X-ray computed tomography[J]. Composites Science and Technology, 2021, 203: 108585.
- [24] GE L, LI H M, LIU B S, et al. Multi-scale elastic property prediction of 3D five-directional braided composites considering pore defects[J]. Composite Structures, 2020, 244: 112287.
- [25] TIAN Z Y, YAN Y, LI J, et al. Progressive damage and failure analysis of three-dimensional braided composites subjected to biaxial tension and compression[J]. Composite Structures, 2018, 185: 496-507.
- [26] LUO H B, LI X, LI Y D, et al. Damage properties of pre-embedded connection of carbon fiber wound composite tubes[J]. Materials Today Communications, 2020, 25: 101525.
- [27] 李嘉禄, 刘谦. 三维编织复合材料中纤维束横截面形状的研究[J]. 复合材料学报, 2001, 18(2): 9-13.
- LI J L, LIU Q. Study on fiber tows' cross-section in 3-D braided composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2001, 18(2): 9-13.

Multi-Scale Mechanical Properties of Three-Dimensional Braided Composite Structures

LUO Haibo^{1, 2}, WANG Qian², YANG Yanchu^{2*}, WU Jun²,
LI Tao², FENG Tao¹, HE Xiaohui², GONG Wentao²

(1. Key Laboratory of Earth Observation of Hainan Province, Hainan Aerospace Information Research Institute,
Wenchang 571300, China;

2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: The mechanical properties of three-dimensional (3D) braided pre-embedded licker-in connecting tubular structures were investigated to provide a basis for near-space engineering applications. First, the meso-structure of a 3D braided unit cell was designed and analyzed to obtain fundamental mechanical parameters, such as elastic modulus and Poisson's ratio. Subsequently, tensile and compressive mechanical tests were conducted on 3D five-directional (3D5D) braided composite tubes with pre-embedded licker-in connections. The structural design parameters influencing load-bearing performance were analyzed, including the effects of the braiding angle, thickness, and configuration on the tube's load capacity. Finally, the failure mechanisms of the tubular structures were examined through damage morphology analysis, and macroscopic structural damage mechanisms were investigated using scanning electron microscopy. The results indicate that under the same outer diameter, 3D5D braided tubes exhibit higher tensile failure loads than 3D5D fully braided tubes. For tubes with identical braiding configurations and outer diameter, the wall thickness enhances compressive failure load, with the $\phi 30t3$ -C tube achieving the highest compressive failure load and the failure mode being manifested as licker-in joint slippage. Meanwhile, both the $\phi 25t3$ -T and $\phi 30t2.5$ -T tubes demonstrate high failure loads, with average tensile loads exceeding 120 kN and the failure mode involves licker-in joint pull-out and fiber bursting at the tube ends. The $\phi 30t3$ -T tube exhibits an average tensile failure load of over 105 kN. The findings serve as an important scientific reference for light-weight, high-strength load-bearing design and flight applications of near-space aerostats.

KEYWORDS: three-dimensional braided composites; meso-structure; pre-embedded connection; mechanical property; damage analysis

(编辑: 夏菁)