

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.04.016

三维编织复合材料圆管轴向压缩性能及破坏机理

熊信发¹, 王校培², 王坤¹, 彭锦峰¹, 蔡登安¹, 周光明¹

(1. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016;

2. 中国人民解放军总参谋部第六十研究所, 南京 210016)

摘要: 通过真空辅助树脂传递模塑成型技术, 制备了三维多层缠绕编织、三维五向面芯编织和三维七向编织 3 种不同三维编织复合材料圆管。系统分析了三维编织复合材料圆管的纱线轨迹, 分别开展了准静态轴向压缩试验, 研究了不同编织工艺对三维编织复合材料圆管的压缩承载、破坏模式及吸能性能的影响。结果表明: 不同编织结构圆管的轴向承载能力和破坏机制存在显著差异。三维多层缠绕编织圆管的环向纱体积含量较高, 能有效承担轴向载荷, 其轴向承载能力明显高于其余两类编织圆管。但由于纤维间载荷传递性能较弱, 易发生脆性破坏, 导致吸能效果最差。而三维五向面芯编织和三维七向编织圆管具有紧密交织的纱线结构, 径向编织纱能有效限制剪切裂纹扩展, 从而引发渐进稳定的开花式破坏, 此类破坏具有较好的吸能特性。三维五向面芯编织圆管纤维断裂更加充分, 吸能效果最为优异。

关键词: 编织复合材料; 圆管; 压缩试验; 破坏模式; 吸能特性

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2023)04-0702-09

Axial Compressive Properties and Failure Mechanism of 3D Braided Composite Tube

XIONG Xinfan¹, WANG Xiaopei², WANG Kun¹, PENG Jinpeng¹, CAI Deng'an¹, ZHOU Guangming¹

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics &

Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. The 60th Research Institute of General Staff Department of PLA,

Nanjing 210016, China)

Abstract: Three-dimensional (3D) braided composite tubes, including 3D multi-layer braided, 3D five-directional surface-core braided, and 3D seven-directional braided tubes, were fabricated by vacuum assisted resin transfer molding. The yarn traces of the 3D braided composite tubes were systematically analyzed. The quasi-static axial compression tests were carried out to investigate the effects of different braiding processes on the compression bearing capacity, failure mode and energy absorption performance of three-dimensional braided composite tubes. The results showed that the axial bearing capacity and failure mechanism of circular tubes with different braided structures were significantly different. 3D multi-layer braided tubes maintained a high volume content of circumferential yarn, which can effectively bear the axial load, making its axial bearing capacity significantly higher than the other two types of braided circular tubes. However, due to the weak load transfer performance between fibers, brittle failure was easy to occur, resulting in the worst energy absorption effect. 3D five-directional surface-core braided and 3D seven-directional braided tubes had closely

基金项目: 国家自然科学基金(52005256); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)资助项目(BK20190394); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(NS2019001); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

收稿日期: 2022-08-29; **修订日期:** 2022-10-17

通信作者: 周光明, 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: zhougm@nuaa.edu.cn。

引用格式: 熊信发, 王校培, 王坤, 等. 三维编织复合材料圆管轴向压缩性能及破坏机理[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(4): 702-710. XIONG Xinfan, WANG Xiaopei, WANG Kun, et al. Axial compressive properties and failure mechanism of 3D braided composite tube[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(4): 702-710.

interwoven yarn structures, and the radial braided yarn can effectively limit the shear crack growth, thus leading to gradual and stable flowering failure. Such failure had better energy absorption characteristics. The fiber of the 3D five-directional surface-core braided tube broke more fully, and the energy absorption effect was the most excellent.

Key words: braided composite; tube; compression test; failure mode; energy absorption characteristic

随着纺织技术的迅速发展,三维编织复合材料以其轻质、比模量大、比强度高、抗疲劳、耐腐蚀等特点,广泛运用于航空航天、交通运输、船舶、体育等领域^[1-2]。与传统层合、缠绕等二维复合材料相比,编织复合材料在厚度方向增加了纱线,形成整体网状结构,具有可设计性强、高断裂韧性、高抗损伤容限等优点^[3-4]。

复合材料管状结构是复合材料在工程应用中常见的结构形式之一,一般通过缠绕、拉挤、卷管等工艺制备得到,具有轻质、高强、稳定性好等优点,近年来受到国内外学者广泛关注。Huang等^[5]通过试验与数值仿真对层合复合材料圆管在轴向压缩载荷作用下的压溃响应和失效机理进行了详细研究,研究发现层合复合材料圆管的破坏形式为渐进式的分层破坏,能量吸收方式主要通过纤维断裂以及界面脱粘。可见,层合复合材料圆管层间性能较差,在受到轴向压缩载荷时易发生分层破坏,极大影响了结构承载和吸能能力。为了提高复合材料圆管的层间性能,人们把目光转向纺织复合材料。管状编织复合材料作为纺织复合材料中的一种典型的结构,主要包含二维和三维编织两类,其中二维编织主要分为双轴编织、三轴编织^[6]。三维编织得益于其独特的可设计性,有着更为丰富的结构形式,其中就包含三维体心编织、三维面芯编织、多层缠绕编织等^[7-9]。编织复合材料圆管除具有轻质、力学性能优越等上述诸多优点外,还拥有很强的能量吸收能力,在车辆、航空等结构耐撞性设计中表现出巨大应用潜力^[10]。目前,国内外学者对编织圆管的力学性能展开了深入研究。

Calme等^[11]对三维编织复合材料圆管横向压缩载荷作用下的失效机理进行了详细研究,研究发现三维编织结构有效避免了圆管在横向压缩下的分层行为,提高了能量吸收率。Chiu等^[12]通过试验研究了三维编织复合材料管的编织参数对轴向压缩性能及破坏模式的影响,并指出轴向纱线控制结构能量吸收,而编织纱线决定了破坏模式。张平等^[13]系统研究了二维三轴编织复合材料圆管的失效机制和能量吸收特性,发现编织圆管在压缩载荷下的破坏模式主要分为花瓣破坏、局部屈曲、块状断裂和突发破坏四类,且发现在相同的纤维体积含量下,增加编织层数或减小编织角能提高结构的吸

能效率。沈怀荣等^[14]通过试验对比分析了三维四向编织和三维五向编织复合材料圆管的压缩力学性能,研究发现三维五向编织圆管相比三维四向编织圆管,其在编织过程中插入了轴向纱线,因此具有较高的轴向承载能力。马小菲等^[15]通过玻璃/芳纶混杂纤维复合材料圆管轴向压缩试验,分析了编织参数和纤维混杂比对圆管压缩性能影响。Zhou等^[16-17]研究了三维编织复合材料圆管的横向冲击响应,基于全尺寸细观结构有限元模型,预测了结构的横向冲击力学性能及破坏过程,分析了三维编织复合材料圆管的横向冲击变形和细观损伤机理。谷元慧等^[18]通过试验对比分析了二维编织圆管与三维四向编织圆管轴向压缩力学性能,结果显示:三维编织圆管具有更优异的轴向承载能力,而二维编织圆管具有较好的吸能特性。Gideon等^[19]建立了三维四向编织复合材料圆管内、中、外三单胞有限元模型,预测了三维编织复合材料圆管的压缩力学性能,指出了内、外单胞对整体结构轴向压缩性能和失效机理有着显著影响,探讨了编织参数对编织圆管压缩行为的影响,并通过试验验证了模型的准确性。McGregor等^[20-21]基于连续性损伤力学模型对不同截面的编织圆管开展了轴向压溃数值模拟研究,预测了圆管在压溃载荷下的损伤机理和失效模式,定量计算出不同损伤机理下的能量吸收率。上述研究表明,编织复合材料的轴向压缩力学性能及其破坏模式依赖于所使用的纤维材料和纤维结构,基于不同编织结构引起的压缩破坏形式有显著差异,而结构的破坏形式决定了其吸能特性。三维五向面芯编织复合材料圆管和三维多层缠绕编织作为两种新型编织工艺,其在复合材料圆管上的应用还处于起步阶段,国内外研究更是鲜有报道。

本文通过真空辅助树脂传递成型(Vacuum assisted resin transfer molding, VARTM)技术,制备了三维多层缠绕编织、三维五向面芯编织、三维七向编织3类编织复合材料圆管。系统分析了三维编织复合材料管的纱线轨迹,并开展准静态轴向压缩试验,探究了不同编织工艺对三维编织复合材料圆管的压缩承载、压缩破坏机理和吸能性能的影响,为扩展材料应用前景、发挥材料性能优势提供有效指导。

1 三维编织复合材料圆管轴向压缩试验

1.1 编织过程

本文研究了3种不同编织工艺的复合材料圆管,包含三维五向面芯编织复合材料圆管(3D surface-core five-directional braided composite tubes, 3DST)、三维多层缠绕编织复合材料圆管(3D multi-layer braided composite tubes, 3DMT)以及三维七向编织复合材料圆管(3D seven-directional braided composite tubes, 3D7DT)。所有编织圆管均采用四步法编织工艺编织而成。如图1所示,在管状编织中,所有纱线均由携纱器携带,且以径向和周向排列形式按预制件截面形状分布于机底盘上,编织时控制携纱器在编织机底盘上的运动路径,每次循环后经过打紧工序将纱线编织于管芯轴上最终形成织物。

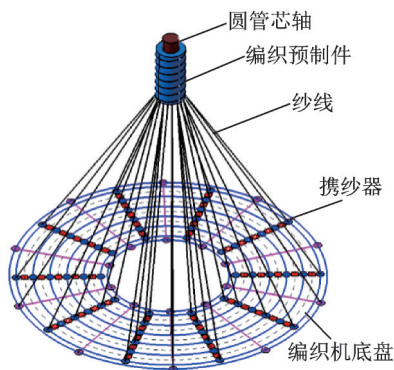


图1 管状编织复合材料编织过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of braiding process of tubular braided composites

图2为三维五向面芯编织圆管的携纱器平面运动规律图和预制件表面形貌图。在编织过程中,环向携纱器沿周向运动,相邻环向携纱器运动方向相反;径向携纱器沿径向运动,相邻径向携纱器运动方向相反,当达到边界时,径向纱移动至相邻列。如图2(a)所示,经过四步编织后,环携纱器A沿周向运动至E,而相邻携纱器A₁沿相反周向运动至E₁;径向携纱器F经过两步编织后到达边界H位置,再经过两步编织后到达携纱器J位置;轴向携纱器始终固定在原位置。蓝色线条表示环向编织纱线运动轨迹在平面内的投影,在编织方向上呈螺旋上升;紫色线条为径向编织纱的平面运动轨迹,其围绕着一列环向纱螺旋上升,将环向纱包裹形成若干沿圆周分布的子块,这也是“面芯”的由来。如图2(b)所示,在编织预制件的表面可以看到两种纱线,即环向纱和径向纱,轴向纱线被编织纱线包裹。

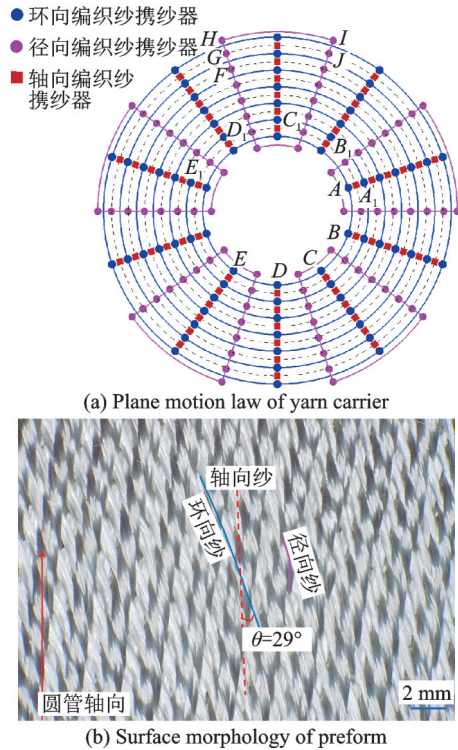


图2 三维五向面芯编织圆管携纱器运动规律

Fig.2 Motion rules of 3D five-directional surface-core braided tube yarn carrier

图3为三维多层缠绕编织圆管的携纱器平面运动规律图和预制件表面形貌图。在编织过程中,环向纱和轴向纱的携纱器运动规律与三维五向面芯编织结构中环向纱运动规律相同。不同之处在于,径向纱只进行径向运动,相邻列运动方向相反,当径向纱运动至内外边界时以向上绕过纬纱(绿色纱线)的方式进入下一层。如图3(a)所示,径向纱携纱器在第二步时由F移动到G,绕过边界的纬纱后在第三步回到F处,其在平面内投影如紫色纱线所示。内外边界上的绿色纱线为纬纱,主要用于固定径向纱。在编织预制件的表面可以清楚地看到环向纱和径向纱,而纬纱则断断续续出现,如图3(b)所示。

图4为三维七向编织结构的携纱器平面运动规律图和预制件表面形貌图。编织过程中,进行第一步时,相邻编织纱携纱器沿相反径向运动,而轴向纱不动;第二步时,相邻编织纱和轴向纱沿相反方向周向运动;第三步和第四步与第一、第二步编织纱、轴向纱运动相反;同时在第二步和第三步径向纱(紫色纱线)插入相邻编织纱之间,在第一步和第四步环向纱(绿色纱线)插入相邻编织纱之间。如图4(a)所示,编织携纱器经过四步后由A运动到E,而轴向携纱器由F移动到G后又回到原位。如图4(b)所示,预制件表面可以清晰看到编织纱线、环向纱线、径向纱线,而轴向纱线被编织线包裹。

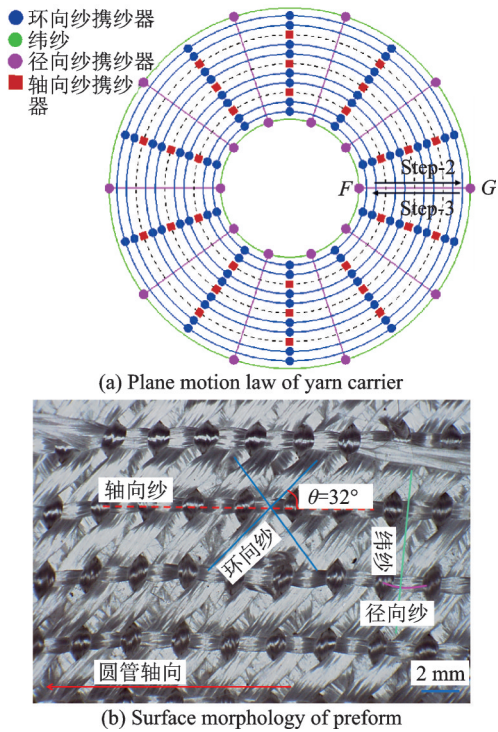


图 3 三维多层缠绕编织圆管携纱器运动规律
Fig.3 Motion rules of 3D multi-layer braided tube yarn carrier

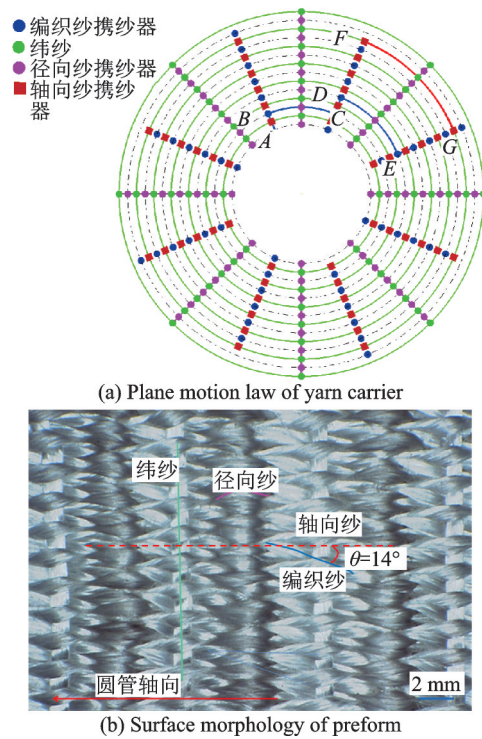


图 4 三维七向编织圆管携纱器运动规律
Fig.4 Motion rules of 3D seven-directional braided tube yarn carrier

由上述编织过程可以看出,为了增强各方向的承载能力,三维七向编织圆管在传统三维四向编织工艺的基础上增加了轴向、径向、纬向 3 个方向纱线,使得载荷传递更加均匀。但在编织过程中,单根编织纱线几乎遍历整个结构,在提高了层间性能

的同时也存在相应局限性。由于较强的纤维连续性,局部纤维损坏可能会导致整个纤维结构遭到破坏,从而影响结构整体力学性能。相比之下,三维五向面芯编织以及三维多层缠绕编织这两类新型编织结构既具有和传统编织结构相同的优良层间性能,从上述编织过程可看出,它们独特的分块式纱线分布使得结构能有效抑制由局部纱线损伤引起的力学性能下降,具有较大应用潜力。

1.2 试样制备

本次试验所用三维编织复合材料圆管预制件由南京玻璃纤维研究设计院编织成型,预制件均由 E 玻璃纤维编织而成,复合成型的基本采用 E51-WSR618 型环氧树脂。预制件的尺寸为高 400 mm×70 mm 内径×78 mm 外径。预制件通过真空辅助树脂传递成型 (Vacuum assisted resin transfer molding, VARTM) 法浸润树脂后固化成型,图 5 为复合材料圆管 VARTM 成型示意图。固化成型后将编织复合材料圆管切割成试样,试样如图 6 所示,表 1 列出了试样的参数。

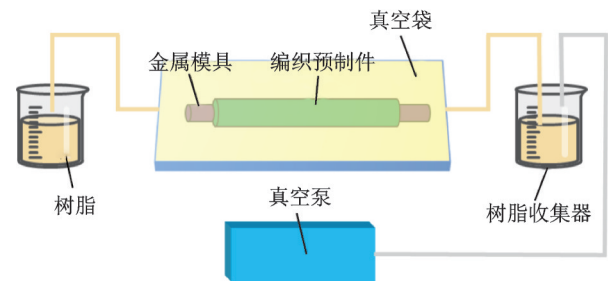


图 5 真空辅助树脂传递成型装置示意图
Fig.5 Schematic diagram of vacuum assisted resin transfer molding device

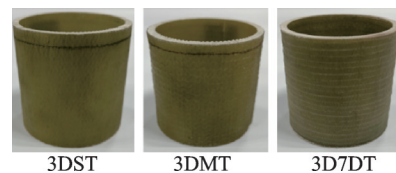


图 6 轴向压缩试样
Fig.6 Axial compression test pieces

表 1 试样参数

Table 1 Specimen parameters

试样	高度/ mm	内径/ mm	厚度/ mm	编织角/ (°)	纤维体积 含量/%
3DST	70	70	4	29	48.3
3DMT	70	70	4	32	43.6
3D7DT	70	70	4	14	45.2

1.3 试验方法

准静态压缩试验在 MTS 810.25 万能试验机上进行。试验过程中参数设置如下:试验加载速率为 3 mm/min,压缩行程为 35 mm。每种类型试样

的数量均为4个,试验结果取均值,利用摄像机记录压缩全程。其中每类各取一件进行压缩破坏观察,即当试样发生初始压缩破坏时将试样取下,使用光学显微镜观察编织圆管的微观损伤情况,以了解结构的压缩失效机理。

2 试验结果及分析

2.1 三维编织复合材料圆管轴向压缩承载性能

图7给出三维多层缠绕编织圆管在准静态轴向压缩条件下的破坏过程及载荷-位移曲线。从图中可以发现,3DMT圆管的载荷-位移曲线有3个典型阶段。在初始A-B阶段,载荷随位移线性增长,且迅速上升至最大值,说明该阶段试样均处于弹性阶段,试样未发生损伤。载荷达到峰值后,材料发生破坏,载荷迅速下降,曲线进入应力卸载B-D阶段。在这一阶段,试样表面首先出现较为明显的与轴向呈约30°夹角方向的剪切裂纹,且裂纹迅速沿圆管两端蔓延,伴随明显的开裂声,载荷急剧下降至C点。随后裂纹继续向两端以及纤维方向扩展,载荷再次下降,但速率相较B-C段更缓慢。经历卸载阶段后,载荷-位移曲线进入稳定平台阶段。此时裂纹几乎扩展完全,但仅维持一段行程后,结构沿裂纹方向发生错位,分成若干块后失去承载能力。从载荷-位移曲线可以看出,3DMT复合材料圆管在压缩载荷下的破坏为脆性破坏。

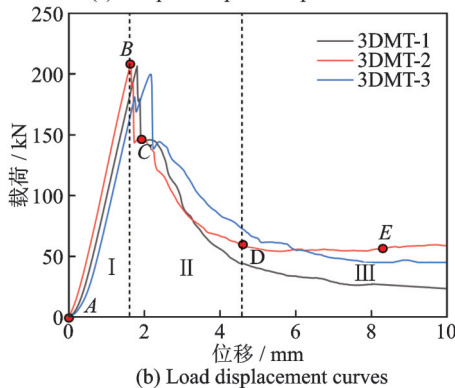
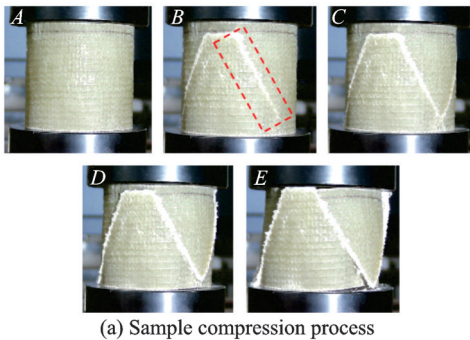


图7 3DMT圆管轴向压缩过程及载荷-位移曲线

Fig.7 Axial compression process and load-displacement curves of 3DMT

图8为三维面芯编织圆管在准静态轴向压缩条件下的破坏过程及载荷-位移曲线。从图中可见,与三维多层缠绕编织圆管相同,3DST圆管的载荷-位移曲线也存在3个典型阶段。在初始A-B阶段,曲线呈线性趋势,结构处于弹性变形状态。当载荷达到127 kN附近时,圆管顶端产生多道沿环向纱方向的基体裂纹,载荷迅速下降,但幅度较小,裂纹缓慢向下蔓延。经历短暂应力卸载阶段后,曲线进入后压溃阶段,其特点为载荷在某一恒定值上下波动,呈周期振荡趋势,载荷每一次下降都来源于裂纹扩展释放能量。3DST复合材料圆管的失效表现为自上而下的渐进压溃破坏,顶端纤维压溃后剩余部分继续承载,载荷波动上升后裂纹继续扩展导致载荷再次下降。

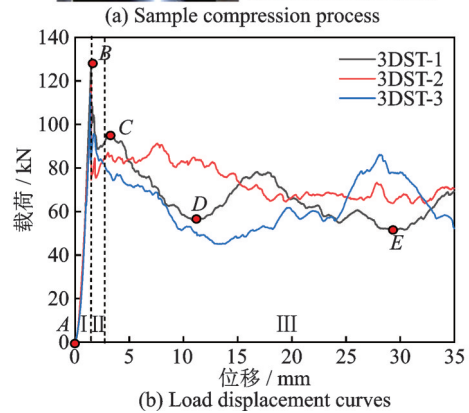
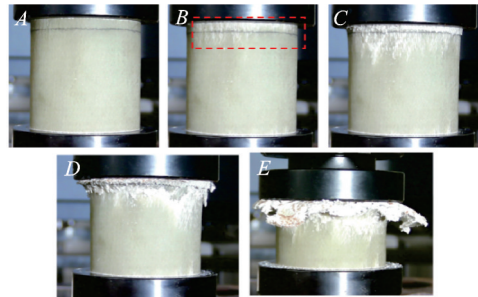


图8 3DST圆管轴向压缩过程及载荷-位移曲线

Fig.8 Axial compression process and load-displacement curves of 3DST

图9为三维七向编织圆管在准静态轴向压缩条件下的破坏过程及载荷-位移曲线。由图可见,3D7DT圆管载荷-位移曲线变化趋势与3DST圆管相似。不同之处在于,载荷达到峰值之前,圆管两端附近首先出现数道周向分布裂纹(见图9(a)中B),导致结构刚度小幅度下降。随着周向裂纹不断沿纬纱方向蔓延,载荷上升至C点时曲线进入应力卸载阶段,此时结构整体发生不同程度的破坏。纤维束在局部区域发生曲屈,加载端纤维开始向外弯曲变形。3D7DT圆管的后压溃阶段与3DST圆管相同,随着加载端纤维不断向外弯曲,局部纤维由于拉伸变形过大而发生断裂,但剩余部分纤维仍能继续支撑,结构仍保持一定完整性,载

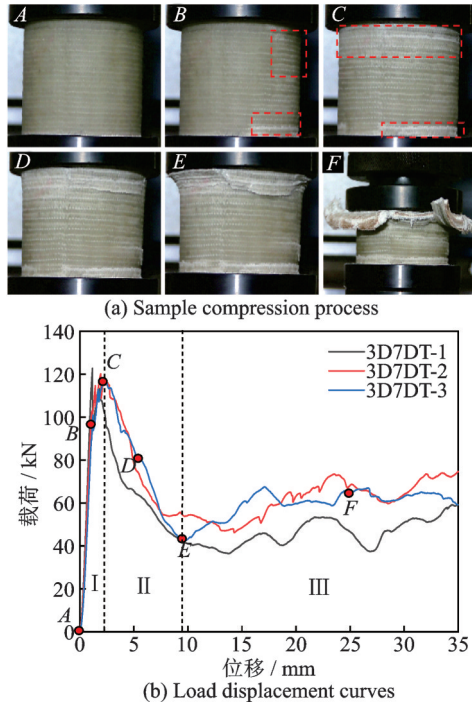


图9 3D7DT圆管轴向压缩过程及载荷-位移曲线
Fig.9 Axial compression process and load-displacement curves of 3D7DT

荷-位移曲线呈周期振荡趋势。

对比3种编织结构的试验结果可以发现,3种编织圆管的载荷-位移曲线均存在3个典型阶段。在初始弹性阶段,3DMT的峰值力以及压缩模量都要高于其他试样,相比之下3D7DT峰值力最低,仅为3DMT试样的57%。说明3DMT试样轴向压缩承载能力较好,这主要是因为3DMT编织结构相比其余两类结构减少了径向、周向纬向纱线比例,增加了环向缠绕纱及轴向纱比例,因此在压缩载荷下具有较高的承载能力。在应力卸载阶段,3DMT曲线下降趋势最为明显,幅度最大,在4 mm行程内载荷下降至峰值载荷的26%。相比之下3DST曲线下降幅度较小,仅下降至其峰值载荷的70%,且速率最快;3D7DT曲线下降至峰值载荷42%,应力卸载行程明显延长。由于3DMT编织结构径向与周向纱线比例相对较低,导致裂纹易沿编织纱方向扩展至整个轴身,发生脆性破坏。3DST、3D7DT圆管的破坏则相对稳定,压缩破坏后结构仍保持一定完整性。

2.2 三维编织复合材料圆管轴向压缩破坏机理分析

三维多层缠绕编织圆管的压缩破坏形式如图10所示。图10中可以清晰看到数条贯穿于轴身且与轴向呈约30°夹角的剪切断口。管外壁断口处显微镜照片可观察到纤维拔出、断裂,内壁编织纱与缠绕纱交织区域纤维发生扭结现象。裂纹附近的

圆管表面存在泛白现象,这是由基体损伤导致的。图10中最右边上、下两幅图为断口沿环向纱切片截面图,图中可明显看到编织纱线产生错位、断裂,这是纤维扭结的典型特征。

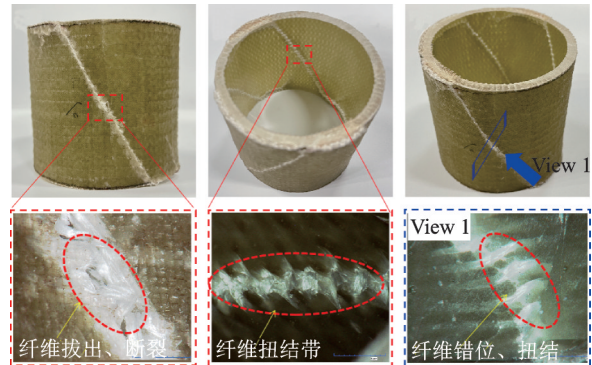


图10 3DMT圆管压缩破坏形态
Fig.10 Compression failure modes of 3DMT tube

相比而言,3DST与3D7DT圆管的破坏分布范围有限,仅在靠近加载端附近形成裂纹。如图11所示,3DST圆管在加载端附近形成较多基体裂纹,这些裂纹在压缩载荷下不断沿编织纱方向扩展,局部编织纱线在失去基体支撑后发生屈曲。3D7DT的破坏模式与3DST类似,编织纱线在周围基体失效后发生屈曲,如图12所示。不同之处在于,3D7DT基体破坏范围更广,且基体裂纹沿纬纱方向分布,从图中可看出大量沿纬纱方向泛白基体损伤带。

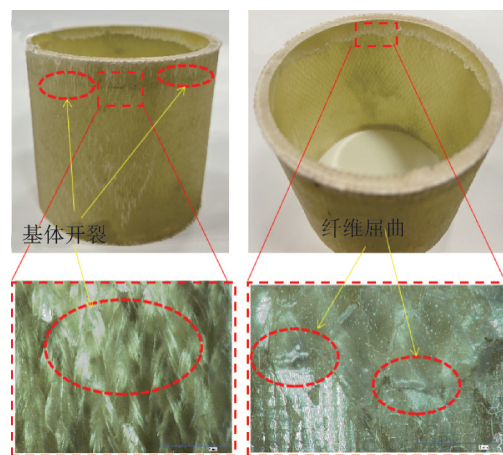


图11 3DST圆管压缩破坏形态
Fig.11 Compression failure modes of 3DST tube

对比3种编织结构在压缩载荷下的破坏模式可以发现,不同编织结构在压缩载荷下的破坏模式差异显著。从失效机理上看,3DMT破坏模式主要为基体失效、纤维扭结,宏观上表现为剪切破坏,而3DST与3D7DT破坏模式主要表现为基体开裂、纤维屈曲断裂。从裂纹扩展方向上看,3DMT与3DST裂纹主要沿环向纱方向扩展,3D7DT裂

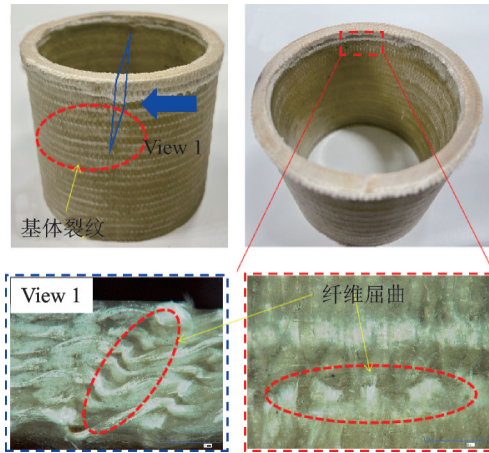


图12 3D7DT圆管压缩破坏形态

Fig.12 Compression failure modes of 3D7DT tube

纹沿环向纬纱方向扩展。

从编织工艺角度上分析,3DMT圆管的环向纱线不参与厚度方向编织,少量的径向纱仅进行折

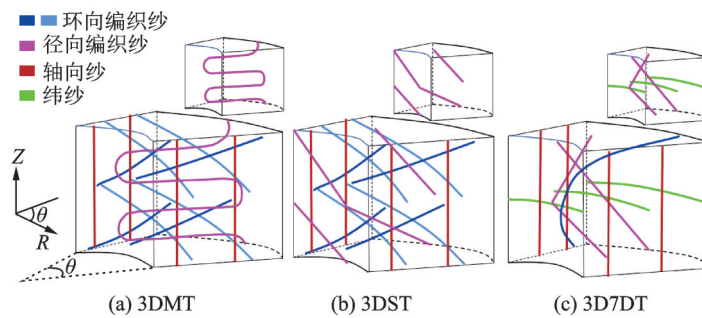


图13 纱线空间拓扑结构

Fig.13 Spatial topological structure of yarn

2.3 三维编织复合材料圆管能量吸收机制分析

为进一步研究3种编织结构在压缩破坏后的压溃行为,以下引入几个重要参数,即初始峰值载荷 P_{max} 、均值载荷 P_{mean} 、比吸能 E_s 、压溃效率 CLE ^[22]。其中初始峰值载荷代表结构的极限承载能力;比吸能指单位质量材料所吸收的能量,是衡量材料结构吸能效果的直接指标;压溃效率则是均值载荷 P_{mean} 与峰值载荷 P_{max} 的比值,数值越大,代表压溃过程更加稳定,参数具体计算公式如下

$$E_s = \frac{U_T}{M} = \frac{\int_0^{S_b} PdS}{\rho AS_b} = \frac{P_{mean} S_b}{\rho AS_b} = \frac{P_{mean}}{\rho A} \quad (1)$$

$$CLE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} \quad (2)$$

式中: P 为载荷; S_b 为压缩总行程; U_T 为吸收总能量; M 为试样压溃部分的质量; ρ 为材料密度; A 为圆管截面积。

根据上述方法计算得到3种编织试样能量吸收情况如图14所示。3DST圆管整体吸能效果和压溃稳定性最为优异,比吸能为46.8 kJ/kg,压溃

叠式向上缠绕,如图13(a)所示。折叠的径向纱载荷传递效率较低,对环向纱线的支撑有限,在承受较大压缩载荷时环向纱易发生剪切破坏,且直接沿着纱线方向扩展至整个轴身。相比之下,3DST、3D7DT圆管减少了环向纱比例,但增加了径向纱线,且径向纱在高度方向上穿插,如图13(b)和13(c)所示,使得环向纱线间载荷传递更紧密,从而避免了剪切裂纹的直接扩展。但由于纱线间丝束交叉紧密,纤维束不可避免地发生弯曲,这使得纤维在基体失效后易发生屈曲,在环向纱线比例减少的共同因素下,最终使得轴向承载能力也相对降低。不仅如此,3D7DT圆管的环向纱线在厚度方向参与编织,纤维交织紧密程度更高,纱线间载荷传递更加均匀,因此破坏时基体开裂范围更大,纤维屈曲程度更明显;同时还插入了更多的周向纬纱,这也限制了圆管的径向变形以及部分裂纹沿环向纱方向蔓延,使得裂纹沿纬纱方向扩展。

效率达到了55.8%,但峰值载荷相对较低。3D7DT圆管吸能效果相对优异,比吸能为36.9 kJ/kg,压溃效率为50.6%,峰值载荷与3DST接近。而3DMT圆管虽有较高的承载能力,但由于发生脆性破坏,卸载前后载荷相差明显,且发生剪切破坏后结构几乎不再具有承载能力,因此比吸能与压溃效率最低。

以上结果不难看出,不同编织结构间的吸能性能存在显著差异,这主要与它们的破坏机理有关。图15给出3类编织结构压溃破坏形式。研究表明^[23],压缩过程中结构吸收的总能量 U_T 可表示为

$$U_T = U_{lc} + U_{sf} + U_{bend} + U_{ff} + U_{fr} + \text{others} \quad (3)$$

式中: U_{lc} 为管壁纵向开裂吸收能量; U_{sf} 为管壁分裂成碎片吸收的能量; U_{bend} 为花瓣叶片弯曲所吸收的能量; U_{ff} 为纤维断裂吸收的能量; U_{fr} 为纤维摩擦所吸收的能量。

对于三维多层缠绕编织圆管,其压溃模式为突发式的剪切破坏,在压缩过程中产生较长的中央裂纹,能量的吸收方式主要通过有限的几个纵向裂纹扩展 U_{lc} ,并没有产生大量纤维断裂、弯曲,导致

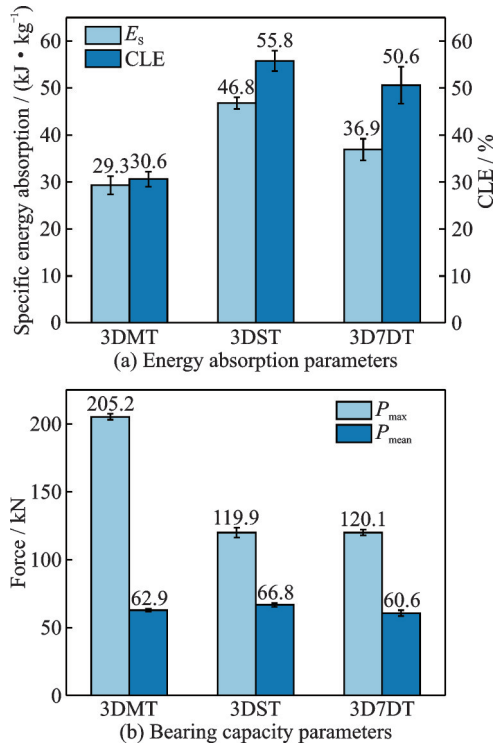


图 14 三维编织复合材料圆管吸能性能

Fig.14 Energy absorption properties of 3D braided composite tube

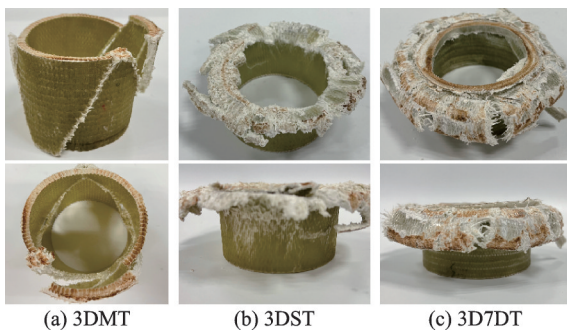


图 15 三维编织复合材料圆管压溃破坏形式

Fig.15 Collapse failure of three-dimensional braided composite tubes

U_{ff} 、 U_{bend} 、 U_{sf} 等能量吸收很低,整体吸能效率最低。

相比之下,三维五向面芯编织圆管与三维七向编织圆管的开花式破坏则表现出更优异的吸能性能。如图 15(b)所示,增加了径向编织纱的 3DST 圆管有效遏制了中央裂纹的直接扩展,转而在试件内部形成大量沿环向纱方向的裂纹,使得管壁分裂成多瓣向下弯曲,产生较多纤维断裂,且裂纹扩展速度相对缓慢。因此,3DST 圆管具有较大的纤维断裂能量吸收 U_{ff} 以及纤维弯曲能量吸收 U_{bend} ,吸能效果和压溃稳定性最为优异。3D7DT 圆管则增加了周向纬纱比例,且纱线交织紧密,减少了大量环向纤维裂纹,向下弯曲的管壁相比 3DST 更加完整,如图 15(c)所示。因此,能量吸收主要依靠管壁纤维弯曲 U_{bend} 以及少量的纤维断裂 U_{ff} ,整体能

量吸收效果相比 3DST 圆管较低。

3 结 论

(1)3DST 和 3D7DT 圆管轴向承载能力明显弱于 3DMT 圆管,环向纱线比例和纱线间交织弯曲程度是影响轴向承载能力的关键,而径向纱对轴向承载能力贡献有限。环向纱线比例越高,纱线交织弯曲程度小,结构轴向承载能力越强。

(2)3DMT 圆管发生剪切脆性破坏,细观上表现为纤维错位、扭结;3DST 与 3D7DT 圆管发生韧性破坏,主要表现为基体开裂、纤维曲屈。紧密交织的径向编织纱能有效避免裂纹直接沿环向纱线方向扩展,但由于纤维弯曲程度大易发生屈曲。

(3)3DST 圆管吸能效果最为优异,其比吸能为 46.8 kJ/kg,压溃效率达到了 55.8%,与 3DMT 圆管和 3D7DT 圆管相比,3DST 圆管比吸能分别提高了 159.7%、118.2%。3DMT 圆管的压溃破坏为突发性剪切破坏,能量吸收主要通过有限几个较长的中央裂纹扩展,因此吸能效率最低。3DST 和 3D7DT 圆管径向和周向纬纱有效遏制了中央裂纹的扩展,形成开花式的稳定压溃破坏模式,能量吸收效果较好。其中 3D7DT 圆管纱线间交织更紧密,且插入的纬纱使裂纹沿周向向下扩展,压溃时向下弯曲的管壁更完整,但纤维断裂数量少,吸能效果弱于 3DST 圆管。

参考文献:

- [1] LIU Z G. Study on comparison of manufacturing methods of high performance composites pipes and application of 3D braiding technology[J]. Journal of Materials Engineering, 2009, 2: 109-112.
- [2] XU K, QIAN X. 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.
- [3] ZHENG Y, SUN Y, LI J, et al. Tensile response of carbon-aramid hybrid 3D braided composites[J]. Materials & Design, 2017, 116: 246-252.
- [4] 曾涛,姜黎黎. 三维编织复合材料力学性能研究进展[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(1): 34-41. ZENG Tao, JIANG Lili. Development of investigation into mechanical properties of 3D braided composites[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2011, 16(1): 34-41.
- [5] HUANG J, WANG X. Numerical and experimental investigations on the axial crushing response of composite tubes[J]. Composite Structures, 2009, 91(2): 222-228.
- [6] 王校培. 三维编织复合材料圆管扭转力学性能及破坏机理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.

- WANG Xiaopei. On torsional mechanical properties and failure mechanisms of 3D braided composite tubes [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [7] 张徐梁, 阳玉球, 阎建华, 等. 碳纤维-玻璃纤维混杂增强环氧树脂三维编织复合材料薄壁圆管压溃吸能特性与损伤机制[J]. 复合材料学报, 2021, 38(9): 2821-2828.
- ZHANG Xuliang, YANG Yuqiu, YAN Jianhua, et al. Crushing energy absorption characteristic and damage mechanism of carbon fiber-glass fiber hybrid reinforced epoxy 3D braided composite thin-walled circular tube[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(9): 2821-2828.
- [8] WANG X, CAID, LIC, et al. Failure analysis of three-dimensional braided composite tubes under torsional load: Experimental study[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2017, 36(12): 878-888.
- [9] 孙璘. 三维面芯编织复合材料力学性能及渐进损伤研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- SUN Jin. Research on mechanical properties and progressive damage of 3D surface-core braided composites [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [10] 谷元慧, 刘晓东, 钱坤, 等. 三维编织复合材料圆管力学性能研究进展[J]. 化工新型材料, 2020, 48(2): 258-262.
- GU Yuanhui, LIU Xiaodong, QIAN Kun, et al. Research progress on mechanical property of 3D braided composite circular tube[J]. *New Chemical Materials*, 2020, 48(2): 258-262.
- [11] CALME O, BIGAUD D, HAMELIN P. 3D braided composite rings under lateral compression[J]. *Composites Science and Technology*, 2005, 65(1): 95-106.
- [12] CHIU C H, LU C K, WU C M. Crushing characteristics of 3-D braided composite square tubes[J]. *Journal of Composite Materials*, 1997, 31(22): 2309-2327.
- [13] 张平, 桂良进, 范子杰. 编织复合材料圆管准静态轴向压缩吸能特性的试验研究[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 146-150.
- ZHANG Ping, GUI Liangjin, FAN Zijie. Experimental investigation on the energy absorption characteristic of braided composite circular tubes subjected to quasi-static axial compression[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, 24(1): 146-150.
- [14] 沈怀荣, 郑文龙. 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[J]. 国防科技大学学报, 1999, 21(1): 9-11.
- SHEN Huairong, ZHENG Wenlong. Investigation on mechanical properties for three-dimensional braided circular tubes and the bearing capacities for the analogue structure of a rocket linking-stage[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 1999, 21(1): 9-11.
- [15] 马小菲, 张国利, 朱有欣, 等. 2D 编织混杂复合材料圆管压缩和弯曲性能研究[J]. 天津工业大学学报, 2014, 33(3): 17-23.
- MA Xiaofei, ZHANG Guoli, ZHU Youxin, et al. Investigation of compression and flexural performance of 2D braided hybrid composite pipe[J]. *Journal of Tianjiong University*, 2014, 33(3): 17-23.
- [16] ZHOU H, PAN Z, GIDEON R K, 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.
- [17] ZHOU H, SUN B, GU B. Responses of 3D four-directional and five-directional circular braided composite tubes under transverse impact[J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2016, 21(4): 353-366.
- [18] 谷元慧, 张典堂, 贾明皓, 等. 碳纤维增强编织复合材料圆管制备及其压缩性能[J]. 纺织学报, 2019, 40(7): 71-77.
- GU Yuanhui, ZHANG Diantang, JIA Minghao, et al. Preparation and compressive properties of carbon fiber reinforce braided composite circular tubes[J]. *Journal of Textile Research*, 2019, 40(7): 71-77.
- [19] GIDEON R K, ZHOU H, WU X, et al. Finite element analysis of 3D circular braided composites tube damage based on three unit cell models under axial compression loading[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2016, 25(4): 574-607.
- [20] MCGREGOR C J, VAZIRI R, POURSAARTIP A, et al. Simulation of progressive damage development in braided composite tubes under axial compression [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, 38(11): 2247-2259.
- [21] MCGREGOR C J, VAZIRI R, XIAO X. Finite element modelling of the progressive crushing of braided composite tubes under axial impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(6): 662-672.
- [22] 宋涛, 余许多, 江晟达, 等. 变刚度碳纤维/环氧树脂复合材料薄壁圆管轴向压溃响应与破坏机制[J]. 复合材料学报, 2021, 38(11): 3598-3612.
- SONG Tao, YU Xuduo, JIANG Shengda, et al. Axial crushing response and failure mechanism of variable stiffness carbon fiber/epoxy resin composite thin-walled tube[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(11): 3598-3612.
- [23] OKANO M, NAKAI A, HAMADA H. Axial crushing performance of braided composite tubes[J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2005, 10(3): 287-294.