

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

张徐梁 阳玉球 阎建华 马岩

Crushing energy absorption characteristics and damage mechanism of carbon fiber-glass fiber hybrid reinforced epoxy 3D braided composite thin-walled circular tube

ZHANG Xuliang, YANG Yuqiu, YAN Jianhua, MA Yan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201210.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碳纤维增强环氧树脂复合材料圆管多胞填充结构吸能特性的准静态压缩试验研究

Quasi-static compression experimental study on energy absorption characteristics of multicellular structures filled with carbon fiber reinforced epoxy composite tubes

复合材料学报. 2021, 38(9): 2894–2903 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210905.001>

纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体准静态压缩吸能机制

Energy absorption mechanism of filament wound composite sandwich cylinder under quasi-static compression loading

复合材料学报. 2017, 34(8): 1764–1771 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161130.002>

不同编织角碳纤维增强聚合物复合材料-Al方管的吸能特性

Energy-absorbing characteristics of carbon fiber reinforced polymer composite-Al square tubes with different braiding angles

复合材料学报. 2020, 37(3): 591–600 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190528.003>

三维编织碳纤维/环氧树脂复合材料横向压缩性质的温度效应

Temperature effect on transverse compressive behaviors of 3D braided carbon fiber/epoxy composites

复合材料学报. 2018, 35(3): 607–615 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170612.004>

三维编织SiC/SiC复合材料拉伸和弯曲损伤机制

Tensile and bending damage mechanism of 3D braided SiC/SiC composites

复合材料学报. 2019, 36(8): 1879–1885 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181018.001>

泡沫铝填充碳纤维增强树脂复合材料薄壁管的压缩变形行为与吸能特性

Compressive deformation behavior and energy absorption of Al foam-filled carbon fiber reinforced plastic thin-walled tube

复合材料学报. 2020, 37(8): 1850–1860 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191206.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20201210.001

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



分享本文

张徐梁¹, 阳玉球^{*2}, 阎建华³, 马岩^{*4}

(1. 东华大学 纺织学院 上海市高性能纤维复合材料省部共建协同创新中心, 上海 201620; 2. 东华大学 产业用纺织品教育部工程研究中心, 上海 201620; 3. 东华大学 纺织科技中心, 上海 201620; 4. 南通大学 纺织服装学院, 南通 226019)

摘要: 基于三维编织成型及真空辅助树脂传递成型技术, 制备了编织纱和轴纱不同混杂方式 (编织纱/轴纱: 碳纤维-碳纤维 (CF-CF)、碳纤维-玻璃纤维 (CF-GF); 玻璃纤维-碳纤维 (GF-CF)) 增强环氧树脂 (EP) 的三类三维编织复合材料薄壁圆管, 通过准静态轴向压溃及详细的破坏断面观察, 研究了纤维混杂方式对薄壁圆管的能量吸收性能和破坏模式的影响。研究发现: CF-CF/EP 样品的比能量吸收值分别比 GF-CF/EP 大 36%, 比 CF-GF/EP 大 12%。编织纱为碳纤维时 (CF-CF/EP 及 CF-GF/EP), 圆管的破坏模式均为折叠破坏模式, 编织纱采用碳纤维能有效地遏制中央裂纹的轴向扩展, 折叠变形的三维结构内部发生了较多细小的微观破坏。而编织纱为玻璃纤维的 GF-CF/EP, 破坏模式则为开花内外弯曲式, 中央裂纹产生, 三维结构呈现分层并向圆管内外弯曲。

关键词: 三维编织; 纤维混杂; 复合材料; 能量吸收机制; 轴向准静态压缩

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2021)09-2821-08

Crushing energy absorption characteristics and damage mechanism of
carbon fiber-glass fiber hybrid reinforced epoxy 3D
braided composite thin-walled circular tube

ZHANG Xuliang¹, YANG Yuqiu^{*2}, YAN Jianhua³, MA Yan^{*4}

(1. Shanghai Collaborative Innovation Center for High Performance Fiber Composites, School of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Key Laboratory of Textile Technology of Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China; 3. Donghua University, Textile Technology Center, Shanghai 201620, China; 4. School of Textile and Clothing, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: Based on 3D braiding and vacuum assisted resin transfer molding, three types of epoxy (EP) matrix three-dimensional braided composite thin-walled circular tubes with different hybrid modes (braided yarn/axial yarn: carbon fiber-carbon fiber (CF-CF), carbon fiber-glass fiber (CF-GF), glass fiber-carbon fiber (GF-CF)) were prepared. Through quasi-static axial crushing and detailed observation of failure section, the influence of fiber hybrid mode of thin-walled tube on energy absorption performance and failure mode was studied. The results show that: the specific energy absorption values of CF-CF/EP samples are 36% and 12% higher than those of GF-CF/EP and CF-GF/EP, respectively. When the braided yarns are made of carbon fiber (CF-CF/EP and CF-GF/EP), the failure mode of circular tube is folding failure mode. Carbon fiber is used in braided yarn to effectively restrain the axial expansion.

收稿日期: 2020-09-14; 修回日期: 2020-10-17; 录用日期: 2020-12-02; 网络首发时间: 2020-12-11 14:11:48

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201210.001>

基金项目: 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金项目 (COMAC-SFGS-2019-342); 江苏省高校自然科学研究面上项目 (19KJB430029)

通信作者: 阳玉球, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为纺织复合材料 E-mail: amy_yuqiu_yang@dhu.edu.cn;
马岩, 博士, 副教授, 研究方向为纺织复合材料 E-mail: mayan0416@ntu.edu.cn

引用格式: 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 characteristics 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(in Chinese).

sion of central crack, and more tiny micro damage occurs in the 3D structure of folding deformation. However, when the braided yarn is made of glass fiber (GF-CF/EP), and the failure mode is flowering and bending inside and outside, the central crack is produced, and the 3D structure presents delamination and bends to the inside and outside of circular tube.

Keywords: three dimensional braiding; fiber hybrid; composite; energy absorption mechanism; quasi-static axial compression

近年来,随着交通事故频发,人们对汽车安全性提出了更高的要求。纤维增强复合材料因其具有性能可设计、比刚度大、比强度高、抗疲劳、高吸能等优点^[1-2],受到汽车领域的广泛青睐。传统的纤维增强复合材料,一般是通过采取短纤维增强基体,或采取长纤维以及二维织物预浸料通过铺层工艺获得复合材料制件。但此类复材的层间无纤维通过,层间性能差,特别是轴向压缩时易产生分层,导致材料底部失稳^[3-6]。三维编织预成形的纤维增强复合材料,具有完全整体的增强系统,纤维在面内和面外的各个方向取向。尤其是厚度方向的增强,理论上有可能消除复合材料的分层现象^[7],其在航空航天领域的机翼上和汽车领域的一些内饰件以及承力件上的得到了应用^[8]。

目前三维编织预成形的纤维增强复合材料的能量吸收研究以碳纤维增强复合材料为主。Zhou H L^[9]等对三维编织碳纤维复合材料管的横向冲击性能进行了实验和数值研究。通过改变编织层数制备了三种编织复合管。在改进的分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB) 装置上进行了三种冲击气压下的横向冲击试验。其试验结果表明,吸收能量随气体压力的增大而增大。编织层数的增加会增加能量吸收。Gu B H^[10]等分析了三维编织碳纤维复合材料在不同应变率压缩下的能量吸收特性。在材料试验机 MTS810.23 和分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB) 装置上对三维四步矩形编织复合材料试件进行了测试,获得了准静态和高应变率状态下的面外和面内压缩应力-应变曲线。发现了三维编织复合材料吸收的能量随应变速率的增加而增加。三维编织复合材料的能量吸收功率随应变速率的增加而增大,主要集中在高频区。而对于准静态压缩,其功率分布在很窄的频率范围内,并且比高应变率下的功率要小。Zhang D^[11]等对八种不同编织结构的三维编织复合材料和传统的二维层状复合材料进行了低速冲击和冲击后压缩试验。瞬态冲击力响应表明,对于三维编织复合材料,纤维和基体作为一个整体来承受冲击载荷,并表现出渐进的破坏过程,这与二维层合板有很大不同。三

维编织复合材料的能量吸收率比二维层合板低 3.53%~7.6%,这意味着基体和纤维损伤所消耗的冲击能量更少。Chiu C H^[12]等研究了三维编织复合材料方管的破碎特性。结果表明,三维碳纤维/环氧编织复合材料管的破坏模式包括压剪破坏、轴向弯曲和局部屈曲、编织物的剪切和拉伸破坏。轴向纱线在能量吸收占主导地位,而编织纱线控制着破坏模式。

考虑到碳纤维成本较高,本研究通过采用玻璃纤维取代部分碳纤维来降低成本,同时还可以得到独特的单项或组合的性质,考察只用单一类型纤维所不易得到的吸能特性。本文基于三维编织成型及真空辅助树脂传递成型技术,制备了编织纱和轴纱不同混杂方式的三维编织复合材料薄壁圆管,通过准静态轴向压溃及光学观察,重点研究薄壁圆管的混杂方式对能量吸收性能和破坏模式的影响,并讨论其压溃失效机理。

1 实验

1.1 材料与试样

本文采用东丽公司生产的 12K T700 碳纤维 (CF) 和浙江巨石集团生产的 1200 tex 398 E6 玻璃纤维 (GF) 为增强体,以 JC-02A 型环氧树脂作为基体制备复合材料薄壁圆管。具体性能参数如表 1 所示。

表 1 原材料性能
Table 1 Properties of raw materials

Property	T700 CF	398 GF	JC-02A epoxy
σ /MPa	4 900	2 450	—
E /GPa	230	81.95	—
ρ /(g·cm ⁻³)	1.8	2.64	1.12

Notes: CF—Carbon fiber; GF—Glass fiber; σ —Tensile strength; E —Tensile modulus; ρ —Density.

1.2 编织及固化

三维编织排纱示意图如图 1 所示。纱线分为编织纱和轴纱两个系统。编织纱挂在机器底盘上可以运动的携纱器上,而轴纱直接挂在机器底盘上。在编织过程中,每个携纱器按一定的规律在机器底盘上沿不同的方向运动,从而带动编织纱

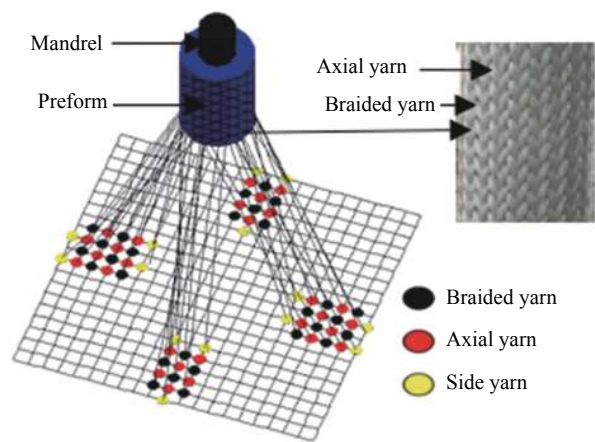


图1 三维五向编织(2层14列)排纱示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 3D five direction braided yarn arrangement with 2 layers and 14 rows

运动，但轴纱不动。所以编织纱在三维空间中相互交织、交叉在一起，同时又把轴纱包围起来，形成一个不分层的整体结构^[13-19]。加入轴纱的编织结构称为三维五向结构，而没有轴纱的结构称为三维四向结构。在编织过程中，由于纱线的交织和交叉，就形成了预制件。三维五向圆管编织预制件使用四步法进行编织^[20-22]。其中，编织角为编织纱与预制件轴向的夹角，编织纱线根数以下式计算：

$$N = n(2m + 1) \tag{1}$$

其中： N 为总纱线根数； n 为列数； m 为层数。主体携纱器按周向和径向排列成主体纱阵，沿径向排列的编织纱携纱器数量代表编织层数 m ，圆

周方向编织纱携纱器数量为编织列数 n ，边纱在主体纱内、外围间隔排列。图1作为例子，显示了2层14列的三维五向编织的排纱示意图。

预制件制成后，如图2所示，通过真空辅助树脂传递成型法(Vacuum assisted resin transfer molding, VARTM)浸润树脂后固化成型。芯模使用实心硅胶棒易于脱模，环氧树脂与固化剂配比为100:85，固化工艺为：90℃条件下保温2 h后，升温至110℃并保温1 h，继续升温至130℃并保温4 h完成固化。试样首先冷却至室温，再进行脱模处理。

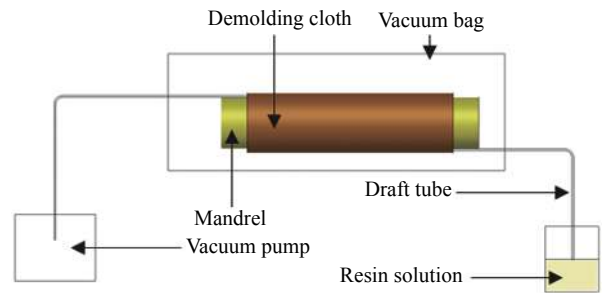


图2 真空辅助树脂传递成型装置示意图
Fig. 2 Schematic diagram of vacuum assisted resin transfer molding device

本文制备了编织纱和轴纱不同混杂方式的三类三维编织复合材料薄壁圆管，以“编织纱-轴纱/基体”方式命名，具体为：碳纤维-碳纤维(CF-CF/EP)、碳纤维-玻璃纤维(CF-GF/EP)、玻璃纤维-碳纤维(GF-CF/EP)。三类编织复合材料薄壁圆管具体参数如表2所示。

表2 三维编织复合材料薄壁圆管的参数

Table 2 Parameters of 3D braided composite thin-walled circular tube

Specimen	$\theta/(^{\circ})$	T/mm	$V_{\text{cf}}/\%$	$V_{\text{gf}}/\%$
CF-CF/EP	32	3.28	45.56	0
CF-GF/EP	33	3.47	27.67	18.86
GF-CF/EP	35	3.88	19.98	26.56

Notes: CF—Carbon fiber; GF—Glass fiber; EP—Epoxy resin; CF-CF/EP—Braiding yarn is CF, axial yarn is CF; CF-GF/EP—Braiding yarn is CF, axial yarn is GF; GF-CF/EP—Braiding yarn is GF, axial yarn is CF; V_{cf} —Fiber volume fraction of carbon fiber, V_{gf} —Fiber volume fraction of glass fiber; T —Thickness of wall; θ —Braiding angle.

1.3 准静态压缩测试及光学观察

薄壁圆管被切割成高度为50 mm的标准试样，一端打磨45°的倒角使管件在压缩过程中获得渐进破坏模式；准静态压缩测试在INSTRON(4206)型的万能试验机上进行，压缩速度为5 mm/min；

利用摄像机记录压缩全程；对压溃后的管件，放入长方体塑料容器中，灌入处理好的树脂没过试样一定高度,进行包埋，再放入烘箱中进行二次固化，固化好后的试样选取截面切割、抛光等处理后，通过光学显微镜观察薄壁管压溃过程中的微

观损伤。

2 结果和讨论

2.1 三维编织复合材料薄壁圆管压缩过程

CF-CF/EP 和 CF-GF/EP 在准静态压缩过程中的破坏过程和载荷-位移曲线分别如图 3 和图 4 所示。

由图 3(a) 和图 3(b) 可见, CF-CF/EP 在整个压缩过程中, 管壁被压缩产生了较小程度的折叠, 其压缩后折叠部分的高度为 13.44 mm, 折叠的数目为 10 个, 一个折叠高度为 1.344 mm; 由图 3(c) 可以看出, CF-CF/EP 的压缩载荷在到达最高点后

仅有较小的波动, 所以这一压缩破坏过程属于稳定的渐进破坏过程。

而由图 4(a) 和图 4(b) 可见, CF-GF/EP 在整在压缩过程中, 管壁被压缩产生了较大的折叠, 其压缩后折叠部分的高度为 15.48 mm, 折叠的数目为 6 个, 一个折叠的高度为 2.58 mm。图 4(c) 表明其压缩破坏过程也是稳定的渐进破坏过程。CF-CF/EP 和 CF-GF/EP 的破坏模式属于渐进式折叠破坏模式。

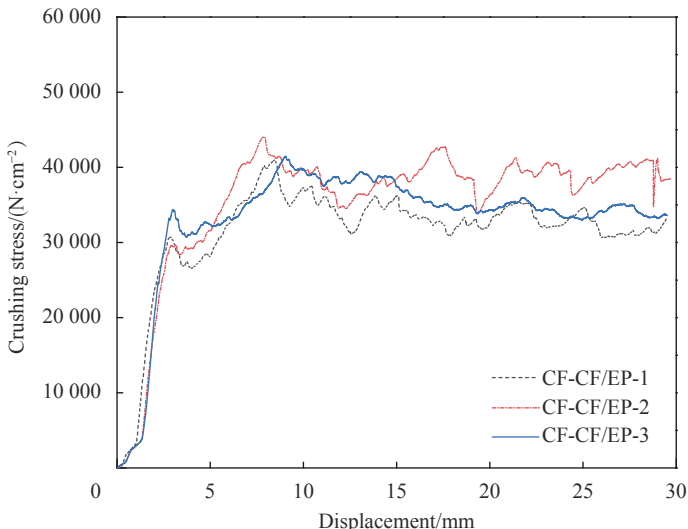
GF-CF/EP 的准静态压缩过程中的破坏形式和载荷-位移曲线图如图 5 所示。



(a) CF-CF/EP axial compression process diagram



(b) Observation of sample after CF-CF/EP compression



(c) CF-CF/EP axial compression load-displacement curves

图 3 CF-CF/EP 轴向压缩过程图及载荷-位移曲线

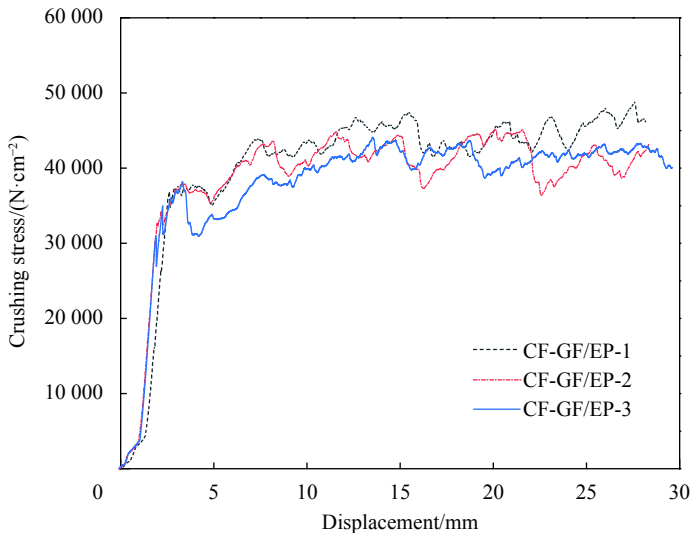
Fig. 3 CF-CF/EP axial compression process diagram and load-displacement curves



(a) CF-GF/EP axial compression process diagram



(b) Observation of sample after CF-GF/EP compression



(c) CF-GF/EP axial compression load-displacement curves

图 4 CF-GF/EP 轴向压缩及载荷-位移曲线

Fig. 4 CF-GF/EP axial compression process diagram and load-displacement curves

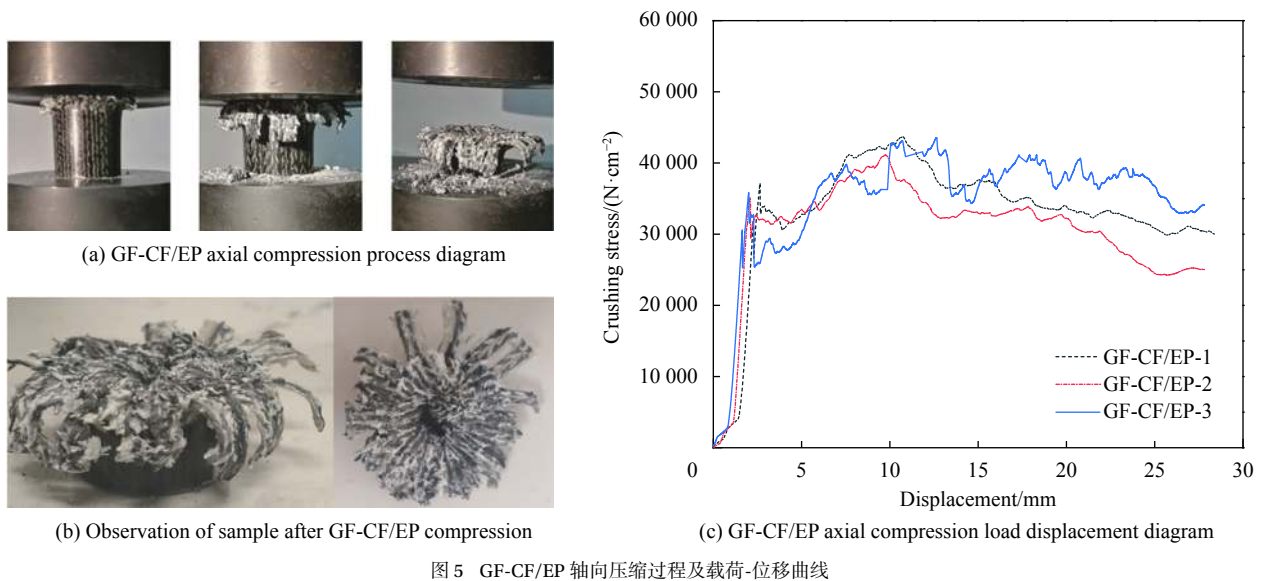


图 5 GF-CF/EP 轴向压缩过程及载荷-位移曲线

由图 5(a) 和图 5(b) 可见, 在整个压缩过程中, GF-CF/EP 管壁被压缩而破裂成众多的碎叶, 且具有树脂及纤维脱落, 并且分别向管内和管外弯曲; 由图 5(c) 可见, GF-CF/EP 载荷在达到最高点后仅有较小的波动, 属于稳定的渐进破坏形式, 而由图 5 可以看出, 不同于折叠破坏模式的 CF-CF/EP 和 CF-GF/EP, GF-CF/EP 在压缩过程中破坏模式为明显的开花内外弯曲式。

2.2 三维编织复合材料薄壁圆管能量吸收性能

比能量吸收值 E_s 是评价材料吸能特性的重要指标, 即总吸收能量 (数值上等于轴向压缩载荷-位移曲线下方面积大小) 与压缩质量的比值^[23-24]。典型的复合材料管件物轴向压缩载荷-位移曲线如图 6 所示, 压缩复材管件在压缩过程中达到第一个峰值载荷之后, 载荷会围绕平均载荷上下波动。开花内外弯曲破坏式和渐进式折叠破坏总能量吸收如以下两式所示:

$$U_T = U_{ff} + U_{bend} + U_{lc} + U_{sf} + U_{fr} + \text{others} \quad (2)$$

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

式中: U_{ff} 为纤维断裂所吸收的能量; U_{bend} 为叶片弯曲所吸收的能量; U_{lc} 为管壁纵向开裂所吸收的能量; U_{sf} 为筒壁分裂成碎叶所吸收的能量; U_{fr} 为摩擦所吸收的能量; U_{fold} 为管壁折叠所吸收的能量。

总能量吸收值 U_T 计算如下:

$$U_T = \int_0^{S_b} P dS \quad (4)$$

式中: S_b 为压缩位移; P 为载荷; S 为位移。

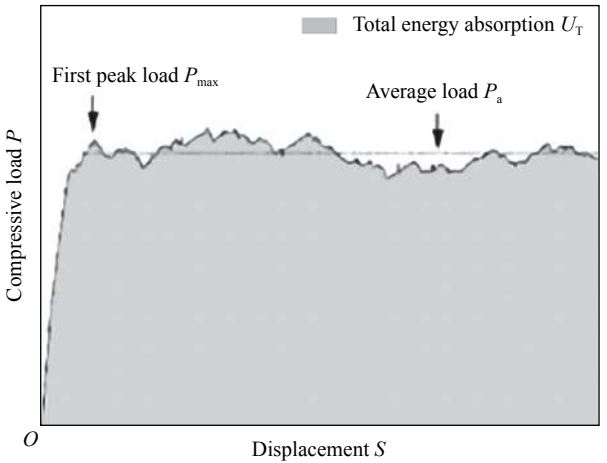


图 6 典型的复合材料管件物轴向压缩载荷-位移曲线^[25]

Fig. 6 Typical axial compression load-displacement curve of composite pipe^[25]

比能量吸收值 E_s 为单位质量的材料所吸收的能量值, 其计算公式为

$$E_s = \int_0^{S_b} P dS / AL\rho \quad (5)$$

式中: A 为试样截面积; L 为试样压缩长度; ρ 为试样密度。

由此方法计算得到的复合材料试样的比能量吸收值如表 3 所示。可以看出, 轴纱相同时, 编织纱为碳纤维的 CF-CF/EP 要比编织纱为玻璃纤维的 GF-CF/EP 比能量吸收值大 36%, 编织纱相同时, 轴纱为碳纤维的 CF-CF/EP 要比轴纱为玻璃纤维的 CF-GF/EP 比能量吸收值大 12%, 由图 3~5 还可以看出, 它们能量吸收的差异与它们之间

表 3 三维编织复合材料薄壁圆管的能量吸收性能

Table 3 Energy absorption properties of 3D braided composite thin-walled circular tube

Type specimen	$P_{\max}/\text{N}$	$S_{P_{\max}}$	U_{T}/J	$S_{U_{\text{T}}}$	$E_{\text{s}}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	$S_{E_{\text{s}}}$
CF-CF/EP	42 606.31	1 205.96	996.36	47.34	80.58	4.12
CF-GF/EP	46 503.92	1 794.68	1 124.13	9.24	70.45	0.37
GF-CF/EP	43 561.49	1 267.68	902.15	28.42	51.64	1.81

Notes: $P_{\max}$ —Maximum load; U_{T} —Total energy absorption; E_{s} —Specific energy absorption; $S_{P_{\max}}$ and $S_{E_{\text{s}}}$, $S_{U_{\text{T}}}$ —Standard deviation of $P_{\max}$ and standard deviation of E_{s} , U_{T} .

的压缩破坏机理有关，破坏机理为渐进式折叠破坏的复合材料薄壁圆管比能量吸收值要比破坏机理为开花内外弯曲式的复合材料薄壁圆管大。

2.3 三维编织复合材料薄壁圆管能量吸收机制

由于能量吸收能力取决于结构破坏的机理，因此本实验通过绘制试样的截面观察图和模式图，研究其能量吸收机制。

图 7 为三维编织复合材料薄壁圆管试样轴向压缩后的截面观察图。可知，CF-CF/EP 其在压缩的上半部分出现了大量的纤维断裂以及纤维束间裂纹，部分纤维出现了碎片化的特征，三维编织结构发生了严重破坏。CF-GF/EP 为明显的渐进式折叠破坏模式，该破坏模式中纤维束具有明显的折叠状态，试样呈 s 型分布。其出现了少量的纤维

束裂纹和纤维束断裂，三维编织结构基本上没有发生破坏。这两种结构，可以有效限制中央裂纹的扩展。GF-CF/EP 从中间劈开分成了两个侧叶，其出现了中央裂纹，在侧叶上也能观察到少量的纤维断裂和纤维束间裂纹，三维编织结构出现了破坏，以编织纱为玻璃纤维的三维结构不能有效控制中央裂纹的扩展。

图 8 为三维编织复合材料薄壁圆管试样的截面破坏模式。可知，CF-CF/EP 的破坏模式为渐进式折叠破坏模式，该破坏模式下，编织纱和轴纱纤维发生了大量的折叠，且发生了纤维的大量断裂，因此吸收能量最大。CF-GF/EP 的破坏模式也为渐进式折叠破坏模式，在压缩的过程中，编织纱和轴纱纤维发生大量的折叠，产生了一些纤维

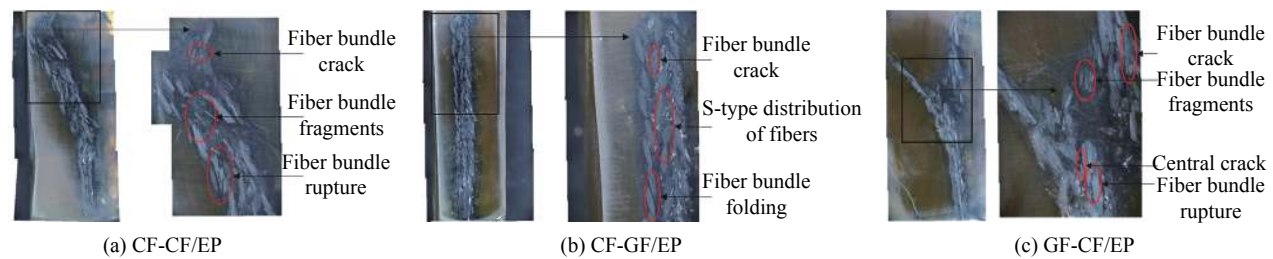


图 7 三维编织复合材料薄壁圆管试样轴向压缩后的截面观察图

Fig. 7 Section view of 3D braided composite thin-walled circular tube sample after axial compression

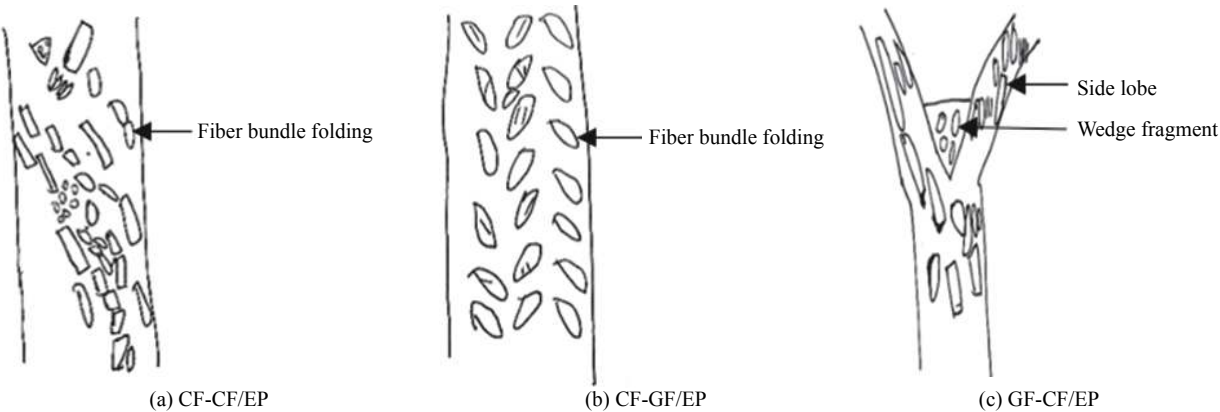


图 8 三维编织复合材料薄壁圆管试样的截面破坏模式

Fig. 8 Failure mode diagram of 3D braided composite thin-walled circular tube sample section

层间裂纹, 但并没有产生大量的纤维断裂, 主要靠纤维的屈曲吸收能量。GF-CF/EP 的破坏模式为开花破坏模式, 该模式中, 管壁出现中央裂纹, 裂纹扩展, 管壁从中间被劈开成向内和向外的叶片, 此模式中, 裂纹扩展是主要的能量吸收机制, 轴纱和编织纱纤维断裂较少, 因此其能量吸收性能最小。由图 8 试样的模式图还可知, 编织纱采用碳纤维的 CF-CF/EP 和 CF-GF/EP, 其能够有效地遏制中央裂纹的轴向扩展, 折叠变形的三维结构内部发生了较多细小的微观破坏, 如纤维断裂、纤维屈曲。而编织纱为玻璃纤维的 GF-CF/EP, 破坏模式则为开花内外弯曲式, 中央裂纹产生, 三维结构呈现分层并向圆管内外弯曲。这表明编织纱控制了破坏机制。

3 结论

(1) 编织纱为碳纤维、轴纱为碳纤维的环氧树脂基三维编织复合材料薄壁圆管 CF-CF/EP 和编织纱为碳纤维、轴纱为玻璃纤维的环氧树脂基三维编织复合材料薄壁圆管 CF-GF/EP 轴向压缩破坏模式为稳定渐进的折叠破坏模式; 编织纱为玻璃纤维、轴纱为碳纤维的环氧树脂基三维编织复合材料薄壁圆管 GF-CF/EP 轴向压缩破坏模式为稳定渐进的开花破坏模式。

(2) CF-CF/EP 和 CF-GF/EP 的折叠破坏吸能特性较 GF-CF/EP 开花破坏的更优异。

(3) 与编织纱为玻璃纤维的 GF-CF/EP 相比, 编织纱为碳纤维的 CF-CF/EP 及 CF-GF/EP 更能有效控制中央裂纹的扩展。

(4) CF-CF/EP 压溃过程中, 大量纤维发生断裂实现高效吸能; GF-CF/EP 出现中央裂纹并扩展, 侧叶弯曲变形而纤维断裂较少, 吸收能量有限。

参考文献:

[1] 王宏雁, 周升波. 复合材料在汽车轻量化中的应用[J]. 汽车研究与开发, 2005(9): 20-23.
WANG H Y, ZHOU S B. Application of composite materials in automobile lightweight[J]. Automotive Research and Development, 2005(9): 20-23(in Chinese).
[2] 凌静, 王庆明. 复合材料部件在汽车轻量化中的应用[J]. 现代零部件, 2013(2): 34-37.
LING J, WANG Q M. Application of composite components in automobile lightweight[J]. Modern Parts, 2013(2): 34-37(in Chinese).
[3] 曾汉民. 高分子复合材料的进展——纤维增强树脂基复合材

料 I: 略论高分子复合材料的发展及其结构和性能的关系[J]. 材料工程, 1989(5): 6-13.
ZENG H M. Progress of polymer composites fiber reinforced resin matrix composites I. Development of polymer composites and relationship between structure and properties[J]. Materials Engineering, 1989(5): 6-13(in Chinese).
[4] 曾汉民. 高分子复合材料的进展——纤维增强树脂基复合材料(续) II: 纤维增强材料和纤维增强热固性树脂复合材料[J]. 材料工程, 1989(6): 8-20.
ZENG H M. Progress of polymer composites fiber reinforced resin matrix composites (Continued) II: Fiber reinforced materials and fiber reinforced thermosetting resin composites[J]. Materials Engineering, 1989(6): 8-20(in Chinese).
[5] 曾汉民. 高分子复合材料的进展——纤维增强树脂基复合材料(续) III: 纤维增强热塑性树脂复合材料最近的进展[J]. 材料工程, 1990(1): 6-15.
ZENG H M. Progress of polymer composites——fiber reinforced resin matrix composites(Continued) III. Recent progress of fiber reinforced thermoplastic resin composites[J]. Materials Engineering, 1990(1): 6-15(in Chinese).
[6] BOISSE P, BAI R, COLMARS J, et al. The need to use generalized continuum mechanics to model 3D textile composite forming[J]. Springer Netherlands, 2018, 25(4): 58-67.
[7] 肖丽华, 李嘉禄. 三维纺织复合材料[J]. 材料导报, 1993(6): 68-73.
XIAO L H, LI J L. 3D textile composites[J]. Materials Guide, 1993(6): 68-73(in Chinese).
[8] 郝新超, 胡杰. 三维编织技术在航空航天中的应用[J]. 中国科技信息, 2019(21): 25-26.
HAO X C, HU J. Application of 3D braiding technology in aerospace[J]. China Science and Technology Information, 2019(21): 25-26(in Chinese).
[9] ZHOU H L, HU D M, GU B H, et al. Transverse impact performance and finite element analysis of three dimensional braided composite tubes with different braiding layers[J]. Composite Structures, 2017, 168(15): 345-359.
[10] GU B H, CHANG F K. Energy absorption features of 3-D braided rectangular composite under different strain rates compressive loading[J]. Aerospace Science and Technology, 2007, 11(7-8): 535-545.
[11] ZHANG D, ZHENG X T, WANG Z B, et al. Effects of braiding architectures on damage resistance and damage tolerance behaviors of 3D braided composites[J]. Composite Structures, 2020(232): 55-65.
[12] CHIU C H, LU C K, WU C M. Energy absorption character-

- istics of 3-D braided composite square tubes[J]. *Composite Material*, 1997(31): 2309-2327.
- [13] 荆云娟, 韦鑫, 张元, 等. 三维编织复合材料的发展及应用现状[J]. *棉纺织技术*, 2019, 47(11): 79-84.
JING Y J, WEI X, ZHANG Y, et al. Development and application status of 3D braided composites[J]. *Cotton Textile Technology*, 2019, 47(11): 79-84(in Chinese).
- [14] XIE C, TAO G Q, LI Q, et al. Experiments and progressive damage analyses of three-dimensional five-directional braided composite joints for propeller[J]. *Polymer Composites*, 2020, 41(8): 123-129.
- [15] XIANG Y, DA Y L, ZHONG Z, et al. Thermo-mechanical stress analyses of solid oxide fuel cell anode based on three-dimensional microstructure reconstruction[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(38): 156-157.
- [16] WANG Z Y, REN J, LIU R, et al. Three dimensional core-shell structured liquid metal/elastomer composite via coaxial direct ink writing for electromagnetic interference shielding[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 136: 167-179.
- [17] JEE Y C, MUSTAFA M, et al. Three dimensional optimisation for the enhancement of astaxanthin recovery from shrimp shell wastes by *Aeromonas hydrophila* [J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2020, 27: 367-350.
- [18] 陈利, 李嘉禄, 李学明. 三维四步法圆型编织结构分析[J]. *复合材料学报*, 2003(02): 76-80.
CHEN L, LI J L, LI X M. Three dimensional four step circular braiding structure analysis[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2003(02): 76-80(in Chinese).
- [19] ADARSH R, BHASKAR K. Three- dimensional analysis of composite FGM rectangular plates with in-plane heterogeneity[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 160: 156-168.
- [20] 陈旭元. 三维编织复合材料力学性能分析及其方法初探[J]. *建材与装饰*, 2019(28): 68-69.
CHEN X Y. Analysis of mechanical properties of 3D braided composites and preliminary study on its methods[J]. *Building Materials and Decoration*, 2019(28): 68-69(in Chinese).
- [21] LI Y Y, PAN Z J, GU B H, et al. Numerical analysis of punch shear failure and stress characteristics of three-dimensional braided composite with different braiding angles[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2019, 28(9): 198-210.
- [22] ZHANG W, MA Q S, DAI K W, et al. Fabrication and properties of three-dimensional braided carbon fiber reinforced SiO₂-rich mullite composites[J]. *Journal of Wuhan University of Technology(Materials Science)*, 2019, 34(4): 569-577.
- [23] FARLEY G L. Effect of specimen geometry on the energy absorption capability of composite materials[J]. *Journal of Composite Materials*, 1986, 20(4): 390-400.
- [24] THORNTON P H, EDWARDS P J. Energy absorption in composite tubes[J]. *Journal of Composite Material*, 1982, 16(6): 521-545.
- [25] 马岩, 阳玉球. 圆-方异形截面复合材料管件物能量吸收机制[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(1): 243-249.
MA Y, YANG Y Q. Energy absorption mechanism of composite pipe with round square cross section[J]. *Acta Composite*, 2015, 32(1): 243-249(in Chinese).