

三维中空织物增强复合材料压缩行为研究

白一峰¹ 冷筱晓^{2a} 李磊¹ 韦生文¹ 邵慧奇² 蒋金华^{2a} 陈南梁^{2a}

1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所,安徽 合肥 230088;
2. 东华大学 a. 产业用纺织品教育部工程研究中心, b. 纺织科技创新中心,上海 201620

摘要: 三维中空织物增强复合材料具有轻量化及力学性能优异等特点,被广泛应用于航空航天、军工、交通运输等领域。为探究三维中空织物增强复合材料的压缩特性,从间隔丝高度、间隔丝角度及树脂质量分数出发,对复合材料进行工艺设计,测试并分析复合材料的压缩性能,明确其损伤失效模式。研究结果显示:三维中空复合材料随着间隔丝高度的增加,压缩强度明显下降;随着间隔丝角度的增加,压缩强度明显提高;适当增加树脂质量分数有利于提高间隔丝的抗压性能,但过量增加树脂质量分数会导致间隔丝角度减小,压缩强度明显下降。三维中空织物增强复合材料的压缩失效模式主要为间隔丝产生局部屈曲并断裂,基体发生断裂脱黏。

关键词: 三维中空织物;复合材料;压缩强度;间隔丝高度;间隔丝角度;树脂质量分数

中图分类号:TS 156;TB 332

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2025)03-0035-06

Study on compression behavior of three-dimensional hollow fabric reinforced composites

Bai Yifeng¹, Leng Xiaoxiao^{2a}, Li Lei¹, Wei Shengwen¹, Shao Huiqi², Jiang Jinhua^{2a}, Chen Nanliang^{2a}

1. The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, Anhui, China;

2. a. Engineering Research Center of Textile Technical, Ministry of Education, b. Innovation Center for Textile Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: Three-dimensional hollow fabric reinforced composites feature lightweight and excellent mechanical properties, are widely used in aerospace, military industry, transportation and other fields. In order to explore the compression characteristics of three-dimensional hollow fabric reinforced composites, process design for the composites was carried out based on the parameters of the height and angle of spacer filament, and resin mass fraction. The compression properties of the composites were tested and analyzed, and their damage failure modes were identified. The results showed that, the compression strength of three-dimensional hollow fabric reinforced composites decreased significantly with the increase of the spacer filament height; with the increase of spacer filament angle, the compression strength increased significantly. Appropriately increasing the resin

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2232020G-06);中国航天科技集团有限公司第八研究院产学研合作基金(SAST2022-027)

收稿日期:2024-12-24

作者简介:白一峰,男,1986年生,高级工程师,主要从事电子装备复合材料结构功能件的研发工作,baifenghefei@163.com

通信作者:邵慧奇,副研究员,主要研究方向为产业用纺织品,hqshao@dh.u.edu.cn

mass fraction was beneficial for enhancing the compression properties of spacer filaments; however, excessive increasing the resin mass fraction would lead to a reduction in the spacer filament angle and a significant decline in compression strength. The compression failure mechanism of three-dimensional hollow fabric reinforced composite was mainly characterized by local buckling and fracture of the spacer filaments, accompanied by matrix fracture and debonding.

Keywords: three-dimensional hollow fabric; composite; compression strength; spacer filament height; spacer filament angle; resin mass fraction

三维中空织物通常由玻璃纤维束、碳纤维束等高性能纤维束经一体化织造而成,其结构由上层面、下层面及Z向直立的经纱间隔丝组成^[1-2]。间隔丝典型的特征是其沿三维中空织物经向呈“8”字形、沿三维中空织物纬向呈“1”字形,具体如图1所示。由三维中空织物增强的复合材料轻质高强,同时具有较好的抗压缩和耐冲击性能^[3-4],可用于制造不同领域的主要承力构件及次要承力构件,在雷达罩、机身蒙皮、壁板等航空军工关键产品中均有应用^[5]。国内外研究人员就三维中空织物增强复合材料的制备与性能展开了初步探究,发现中空复合材料的力学性能不仅与蜂窝夹芯复合材料的力学性能相当^[6-7],还克服了传统夹层结构复合材料层间强度低的缺点,具备整体成形和整体受力的特性,可作为夹层是蜂窝结构、泡沫结构等复合材料的替代品。但目前三维中空织物增强复合材料的制备工艺还有待优化^[8],其结构及工艺对材料服役性能的影响规律尚不明确。此外,有关三维中空织物增强复合材料失效破坏机制的研究也有待进一步完善和扩展。

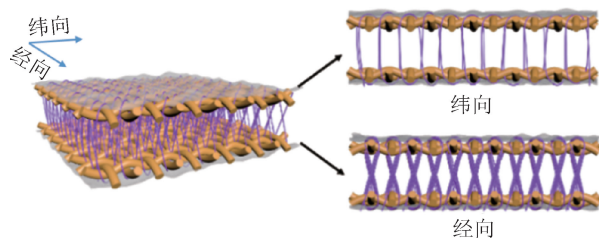


图1 三维中空织物结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three-dimensional hollow fabric structure

本文为进一步明确三维中空织物增强复合材料的压缩特性,探究了间隔丝高度、间隔丝角度和树脂质量分数对三维中空织物增强复合材料压缩性能的影响,以及其损伤失效模式,以期三维中空织物增强复合材料的进一步推广和应用提供试验和理论

支撑。

1 试验部分

1.1 三维中空织物增强复合材料的制备

1.1.1 原料与设备

三维中空织物:纤维原料为无碱玻璃纤维,经纱和纬纱线密度皆为 132 tex,间隔丝线密度为 200 tex,间隔丝高度分别为 8、10、15 及 20 mm,合肥空天新材料科技有限公司提供。

树脂基体:由热固性环氧树脂(WBH-120,昆山裕博复合材料公司提供)与固化剂按 3:1 的质量比配制而成。

主要设备:电子精密天平、三量数显角度尺、真空辅助成型系统、MTS-E43.504 电子万能试验机、电热鼓风干燥箱等。

1.1.2 三维中空织物增强复合材料的制备

三维中空织物增强复合材料采用真空辅助成型工艺制备,其过程如图2所示。首先,将准备的三维中空织物在无模具作用下放置于真空辅助成型系统中,密封并抽真空;然后,调配好的树脂在真空负压作用下被吸入,实现对三维中空织物的浸渍;最后,将浸渍了树脂的三维中空织物放入电热鼓风干燥箱中,先 50 °C 保温 300 min,再升温至 80 °C 保温 480 min,待树脂完全固化后,即得三维中空织物增强复合材料。

本文制备了多种不同规格和工艺参数的三维中空织物增强复合材料试样:

(1) 间隔丝高度分别为 8、10 及 15 mm 的三维中空织物增强复合材料,编号分别为 1[#]、2[#]及 3[#]。

(2) 以间隔丝高度为 20 mm 的三维中空织物为增强体,采取不同的间隔丝角度,制备不同层间高度的三维中空织物增强复合材料(表1)。其中,间隔

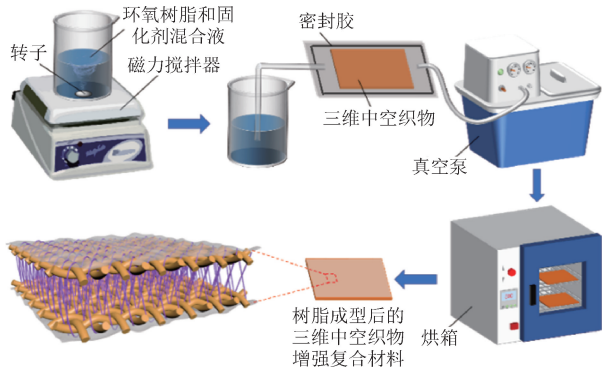


图 2 三维中空织物增强复合材料成型工艺

Fig. 2 Forming process of three-dimensional hollow fabric reinforced composite

丝角度 (θ) 指间隔丝取向方向与面层的夹角。

表 1 不同间隔丝角度的三维中空织物增强复合材料

Tab. 1 Three-dimensional hollow fabric reinforced composites with different spacer filaments' angles

编号	间隔丝角度/(°)	层间高度/mm
4 [#]	52.55	15.00
5 [#]	60.45	16.00
6 [#]	74.45	18.00
7 [#]	85.50	20.00

(3) 以间隔丝高度为 20 mm 的三维中空织物为增强体,在真空辅助成型后,通过手工涂覆树脂,控制涂覆的树脂质量,制备了 4 种树脂质量分数 (43.69%、52.36%、56.08% 及 59.74%) 的三维中空织物增强复合材料,相应编号为 8[#]、9[#]、10[#] 及 11[#]。其中,树脂质量分数为树脂总质量占复合材料整体质量的百分数。

1.2 压缩性能测试

参照 GB/T 1453—2022《夹层结构或芯子平压性能试验方法》,测试三维中空织物增强复合材料的压缩性能。测试时,取试样尺寸为 30 mm × 30 mm,控制仪器加载速度为 2 mm/min。每种试样测 5 个平行试样,结果取平均值。

2 结果与分析

2.1 三维中空织物增强复合材料的压缩行为

图 3 和图 4 以 7[#] 试样为例,展示了三维中空织物增强复合材料典型的压缩过程及压缩载荷-纵向位移曲线。从图 4 可以看出,三维中空织物增强复

合材料的压缩载荷-纵向位移曲线可分为 3 个阶段——弹性阶段、压缩阶段及致密阶段。弹性阶段,随着纵向位移的增加,复合材料承受的压缩载荷呈线性上升趋势,间隔丝因受到垂直方向的压缩而产生轻微的损伤和裂缝,间隔丝中部发生弯曲,横向位移不明显。压缩阶段,随着试样承受的压缩载荷达到峰值,间隔丝发生屈曲,上层面板出现较大的横向位移,压缩载荷有所下降。且随着横向位移的增加,间隔丝出现倾斜,压缩载荷逐渐向面板与间隔丝之间的接头处转移。接头处的间隔丝通过旋转缓冲整体的压缩应变,但这会继续增加面板的横向和纵向位移,因此三维中空织物增强复合材料具备一定的吸收和减缓冲击能量的能力。致密阶段,随着压缩载荷的继续增加,间隔丝逐渐被压实,三维中空织物增强复合材料最终被压成平板。

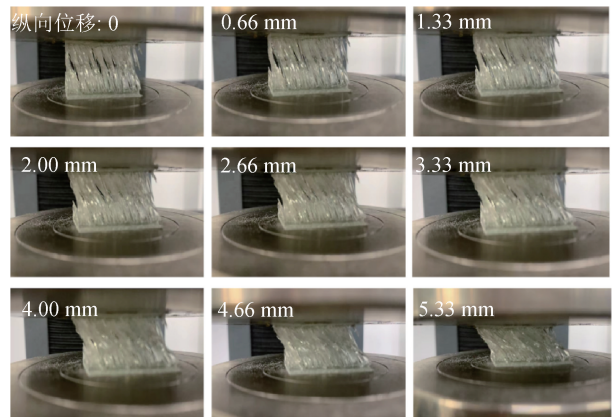


图 3 三维中空织物增强复合材料压缩过程及其纵向位移
Fig. 3 Compression process and force direction displacements of three-dimensional hollow fabric reinforced composite

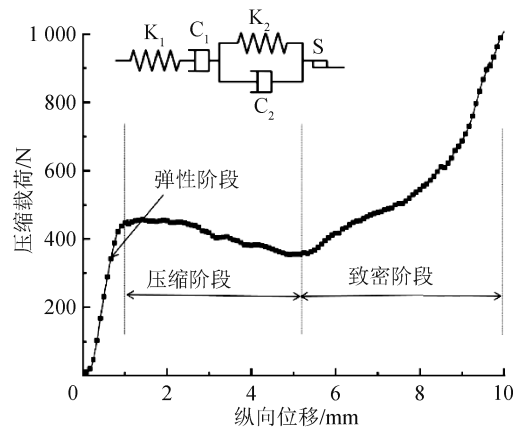


图 4 三维中空织物增强复合材料压缩载荷-纵向位移曲线
Fig. 4 Compression load-force direction displacement curve of three-dimensional hollow fabric reinforced composite

进一步分析三维中空增强复合材料的压缩载荷-纵向位移曲线可以发现,该复合材料具备黏弹性和塑性,其兼具 Maxwell 模型和 Kelvin 模型的特征。因此,三维中空织物增强复合材料的力学模型可视为由 Maxwell 模型单元(弹簧 K_1 和阻尼器 C_1 串联组成)、Kelvin 模型单元(弹簧 K_2 和阻尼器 C_2 并联组成)及塑性元件 S 组合而成。利用该力学模型可以对三维中空织物增强复合材料的缓冲性能进行较好的解释:在初始压缩阶段,弹性变形 x_1 在加载瞬间产生且线性可逆,其与弹簧 K_1 的压缩过程对应,符合胡克定律;继续增加压缩载荷,此时会出现可逆变形量(该变形量与模型中的元件 K_2 、 C_2 相关)和不可逆变形量(该变形量与模型中的元件 C_1 与 S 相关),且这 2 种变形量都呈非线性增长态势;压缩试验结束后,压盘离开试样,此时弹性变形和可逆变形都能恢复到原位,但不可逆变形会有较大的残留。因此,当复合材料完成压缩试验后,已被压扁的试样虽会有一定程度的恢复,但仍小于初始试样的高度,这也从侧面体现了该结构的复合材料具有明显的塑性特征。

利用光学显微镜观察三维中空织物增强复合材料压缩损伤形貌(图 5),可以看出:在压缩载荷的作用下,作用力沿着间隔丝扩散传递,间隔丝中部先形成应力集中区并产生局部屈曲;接着作用力引起间隔丝和树脂形变,导致间隔丝和树脂发生脱黏,间隔丝因周围基体被破坏而失去支撑并发生断裂,最终复合材料失效。

2.2 三维中空织物增强复合材料压缩性能影响因素

2.2.1 间隔丝高度

图 6 所示为不同间隔丝高度的三维中空织物增强复合材料(1#~3#试样)的压缩性能测试结果。由图 6 可知,随着间隔丝高度的增加,复合材料的压缩强度呈明显的下降趋势。当间隔丝高度从 8 mm 增加到 10 mm,压缩强度从 1.40 MPa 下降到 0.96 MPa;当间隔丝高度从 10 mm 增加到 15 mm,压缩强度从 0.96 MPa 下降到 0.42 MPa。这与间隔丝对树脂的芯吸特性有关。当间隔丝高度较小时,“8”字形的间隔丝中纤维贴合紧密,灌注树脂时,树脂由于芯吸效应迅速填满纤维间隙。固化后的间隔丝呈实心粗杆状,复合材料表现为较大的压缩强度。随着间隔丝高度的增加,间隔丝对树脂的芯吸效应减弱,树脂

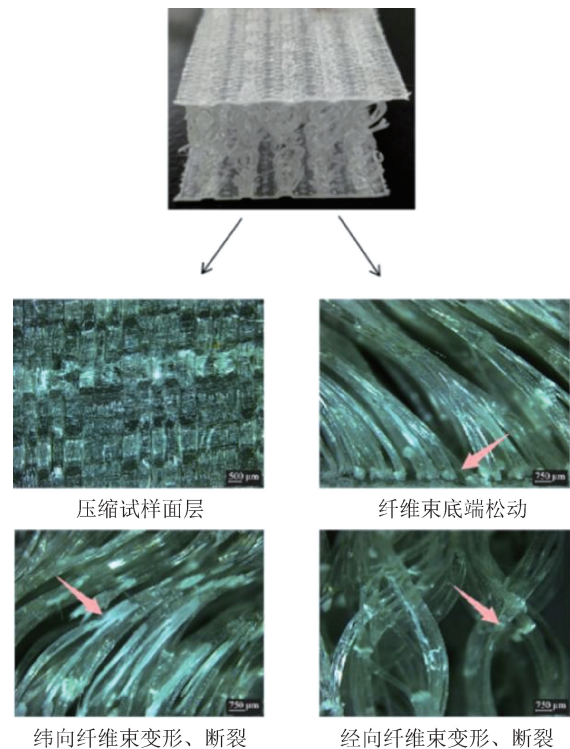


图 5 三维中空织物增强复合材料压缩损伤形貌

Fig. 5 Compression damage morphology of three-dimensional hollow fabric reinforced composite

易在靠近面层的间隔丝根部堆积,而间隔丝中部得不到充足的树脂浸润,固化后复合材料刚度存在缺陷,故压缩强度下降。

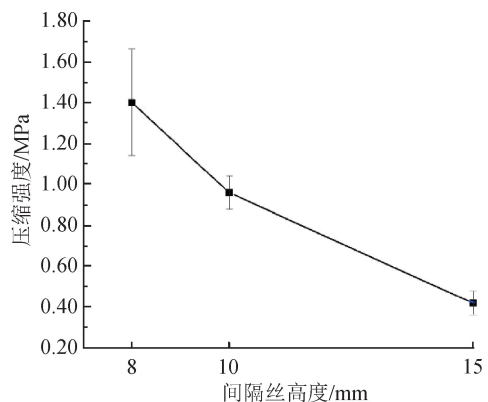


图 6 不同间隔丝高度三维中空复合材料的压缩性能

Fig. 6 Compressive properties of three-dimensional hollow fabric reinforced composites with different spacer filament heights

2.2.2 间隔丝角度

不同间隔丝角度的三维中空织物增强复合材料(4#~7#试样)的压缩性能测试结果如图 7 所示,可以看出,随着间隔丝角度及层间高度的增加,复合材

料的压缩强度呈现明显的上升趋势。

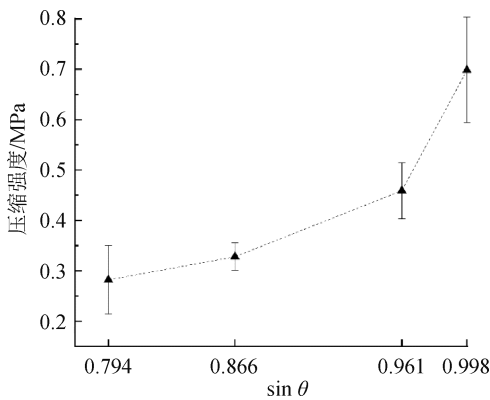


图 7 不同间隔丝角度三维中空织物增强复合材料的压缩性能
Fig. 7 Compressive properties of three-dimensional hollow fabric reinforced composites with different spacer filament angles

从受力层面分析不同间隔丝角度的三维中空织物增强复合材料的压缩载荷(图 8)。当压缩载荷(F)垂直作用于复合材料上层面板时,其可分解为沿间隔丝取向方向的分力 $F\sin\theta$ 和垂直于间隔丝取向方向的分力 $F\cos\theta$ 。复合材料主要的承力件是间隔丝。当间隔丝角度较小时,间隔丝在压缩过程中无法发挥对抗压缩载荷的支撑作用,即间隔丝角度的减小会造成其抗压方向上纤维强度利用系数的降低。随着间隔丝角度的增加,沿间隔丝方向的分力增加,同时通过间隔丝可以将载荷更好地传递到面层,从而提高中空结构复合材料的抗压能力。

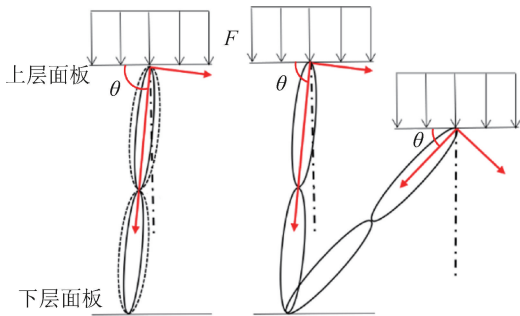


图 8 不同间隔丝角度的三维中空织物增强复合材料受力情况
Fig. 8 Stress situation of three-dimensional hollow fabric reinforced composites with different spacer filament angles

2.2.3 树脂质量分数

图 9 展示了不同树脂质量分数的三维中空织物增强复合材料(8# ~ 11# 试样)的压缩性能测试结果。从图 9 可以看出,随着树脂质量分数的增加,复合材

料的压缩强度先上升,但当树脂质量分数超过 52.36%后压缩强度迅速下降。原因主要在于,适当提高树脂质量分数有利于增强间隔丝表面树脂的附着,从而增大固化后间隔丝的刚度;过量增加树脂质量分数,则黏附在间隔丝表面的树脂质量会因 WBH-120 型环氧树脂流动性较好而增加有限,复合材料的压缩强度不再增加,同时面层树脂质量增加,并在重力作用下间隔丝发生倾斜,间隔丝角度减小(图 10),复合材料压缩强度迅速下降。

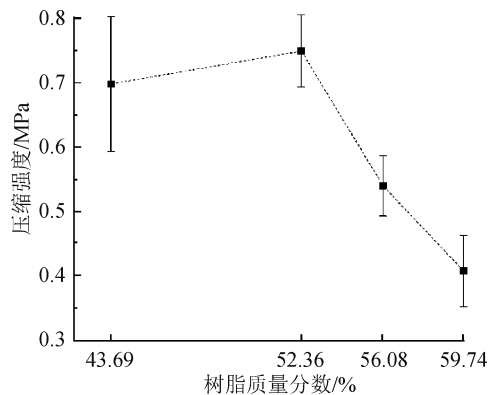


图 9 不同树脂质量分数三维中空织物增强复合材料的压缩性能
Fig. 9 Compressive properties of three-dimensional hollow fabric reinforced composites with different resin mass fractions

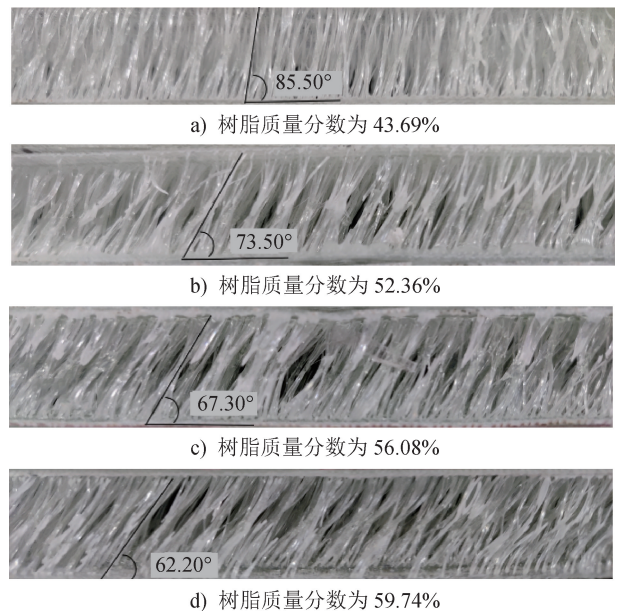


图 10 不同树脂质量分数三维中空织物增强复合材料的截面照片
Fig. 10 Cross-sectional photos of three-dimensional hollow fabric reinforced composites with different resin mass fractions

因此,采用真空辅助成型工艺制备三维中空织物增强复合材料时,需适当控制复合材料的树脂质量分数。

3 结论

通过压缩试验探究了影响三维中空织物增强复合材料压缩性能的因素,分析了三维中空织物增强复合材料的压缩失效模式,得到以下结论:

(1)随着间隔丝高度的增加,三维中空织物增强复合材料压缩强度下降明显,这与间隔织物的结构特征有关。当间隔丝高度较小时,间隔丝被树脂充分浸润,并在固化后呈较粗的实心杆状,抗压缩能力较强;随着间隔丝高度的增加,间隔丝对树脂的芯吸作用减弱,造成间隔丝中部树脂含量不足,复合材料压缩强度下降。

(2)随着间隔丝角度的增加,三维中空织物增强复合材料的压缩强度上升明显。当间隔丝角度较大时,间隔丝能更好地发挥抗压作用,复合材料抗失稳能力增强。

(3)随着树脂质量分数的增加,三维中空织物增强复合材料压缩强度先上升后下降。原因主要是,适当增加树脂质量分数有利于提高间隔丝的抗压性能,而过量的树脂会增加面层质量,导致间隔丝角度减小,复合材料压缩强度降低。

(4)三维中空织物增强复合材料的压缩失效模式主要为,间隔丝在压缩过程中产生局部屈曲并断裂,基体发生断裂脱黏。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 谢治云,李文斌,余鹏举,等. 间隔织物的研制及其树脂增强复合材料压缩回弹性能的研究[J]. 产业用纺织品, 2022, 40(5): 12-17.
- [2] 景波,丁辛,周祝林. 机织间隔织物柱纱高度的确定[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2012, 38(1): 31-33.
- [3] 杨铁鑫,杨浩伟,师建军,等. 纱线连接的间隔织物三维几何模型的建立[J]. 产业用纺织品, 2022, 40(11): 37-43.
- [4] 杜子林,王芮杰,郑连刚,等. 预定型弯曲柱纱三维机织间隔复合材料的压缩性能[J]. 产业用纺织品, 2023, 41(8): 24-29.
- [5] 郭章新,李忠贵,崔俊杰,等. 三维整体中空复合材料的力学性能研究进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(4): 22-31.
- [6] FAN H L, YANG W, ZHOU Q. Experimental research of compressive responses of multi-layered woven textile sandwich panels under quasi-static loading [J]. Composites Part B: Engineering, 2011, 42 (5): 1151-1156.
- [7] FAN H L, ZHAO L, CHEN H L, et al. Ductile deformation mechanisms and designing instructions for integrated woven textile sandwich composites [J]. Composites Science and Technology, 2012, 72 (12): 1338-1343.
- [8] 陶积柏,王绍凯,李敏,等. 三维夹芯层连织物复合材料真空辅助成型工艺影响因素[J]. 复合材料学报, 2010, 27(4): 81-86.

精打细算用好水资源, 从严从细管好水资源。