



纺织复合材料纤维预制体力学性能测试方法研究进展

杨志 焦亚男 谢军波 焦伟 王玉 邵梦洁 陈利

Research progress in testing methods of mechanical properties of textile composite fiber preforms

YANG Zhi, JIAO Ya'nan, XIE Junbo, JIAO Wei, WANG Yu, SHAO Mengjie, CHEN Li

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210820.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纺织复合材料预制体成型过程无损检测技术研究进展

Research progress in nondestructive testing technologies for textile composite preform forming process

复合材料学报. 2021, 38(4): 1029–1042 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.2021021.002>

定型剂对经编织物液态成型复合材料工艺性及其力学性能的影响

Effects of tackifier on liquid composite molding processes and mechanical properties of non-crimp fabric composite

复合材料学报. 2017, 34(4): 737–743 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160630.002>

深海纤维增强树脂复合材料圆柱耐压壳力学性能的研究进展

Research progress on mechanical properties of deep-sea fiber reinforced resin composite cylindrical pressure shells

复合材料学报. 2020, 37(1): 16–26 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190929.003>

不平衡2.5D碳纤维机织预制体偏轴拉伸性能

Bias-tensile properties for the unbalanced 2.5D carbon fibre woven preforms

复合材料学报. 2020, 37(2): 293–301 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190430.002>

纳米改性连续纤维增强热塑性树脂复合材料及其力学性能研究进展

Development and mechanical properties of nano-modified continuous fiber reinforced thermoplastic composites

复合材料学报. 2019, 36(4): 771–783 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181018.002>

2.5D机织石英纤维增强树脂复合材料不同方向力学性能测试与模量预测 2.5D机织石英纤维增强树脂复合材料不同方向力学性能测试与模量预测

Mechanical properties testing for 2.5D quartz fiber reinforced resin composites in different directions and module prediction

复合材料学报. 2019, 36(6): 1364–1373 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180906.001>



纺织复合材料纤维预制体力学性能测试方法研究进展



分享本文

杨志^{1,2}, 焦亚男^{1,2}, 谢军波^{*1,2}, 焦伟^{1,2}, 王玉^{1,2}, 邵梦洁^{1,2}, 陈利^{1,2}

(1. 天津工业大学 复合材料研究院纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300387;

2. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387)

摘要: 纺织复合材料具有质量轻、强度高, 可设计性强等诸多优势, 在航空航天领域得到广泛应用。纺织预制体的纤维结构对复合材料的最终力学性能有着决定性影响。然而, 预制体的纤维结构在织造过程中不可避免地会发生宏观尺寸和微细观结构的变形, 甚至产生褶皱缺陷。纺织预制体作为一种柔性骨架, 其变形机制十分复杂。采用试验测试来表征预制体的力学变形特性是最直接、最有效的方法, 也是建立理论和数值分析模型的基础。本文对纺织复合材料预制体的拉伸、压缩、弯曲、剪切和成型试验等测试方法进行了综述, 讨论了不同测试方法的优缺点及适用条件, 对后续的研究工作进行了展望。本研究将为预制体力学测试技术的改进、测试标准的建立和成型过程中的准确控形提供理论指导, 对纺织复合材料的结构设计和工程应用起到推动作用。

关键词: 纺织复合材料; 预制体; 力学性能; 测试方法; 变形机制

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)04-1511-23

Research progress in testing methods of mechanical properties of textile composite fiber preforms

YANG Zhi^{1,2}, JIAO Ya'nan^{1,2}, XIE Junbo^{*1,2}, JIAO Wei^{1,2}, WANG Yu^{1,2}, SHAO Mengjie^{1,2}, CHEN Li^{1,2}

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Advanced Textile Composite Materials, Institute of Composite Materials, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Textile composites are widely used in aerospace field because of its advantages of light weight, high strength and strong designability. The fiber structure of textile preform determines the final mechanical properties of composites. However, the fiber structure of preform inevitably undergoes macro-scale and micro-structure deformation during the weaving process, and even wrinkle defects. The preform is a flexible skeleton, and its deformation mechanism is very complicated. Test is the most direct method to characterize the mechanical properties of preform, and it is also the basis of establishing theoretical and numerical analysis model. In this paper, the basic test methods of textile composite preform, such as tensile test, compression test, bending test, shear test and forming test, are reviewed. The advantages, disadvantages and applicable conditions of different test methods are discussed, and the future research work is prospected. The work in this paper will provide theoretical guidance for the improvement of preform mechanics testing technology, the establishment of testing standards and the accurate control of shape during the forming process. It will promote the structural design and engineering application of textile composites.

收稿日期: 2021-07-08; 修回日期: 2021-08-05; 录用日期: 2021-08-07; 网络首发时间: 2021-08-20 18:52:19

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210820.001>

基金项目: 天津市教委科研计划项目 (2018KJ195)

通信作者: 谢军波, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为复合材料力学、织物力学 E-mail: xiejunbo@tiangong.edu.cn

引用格式: 杨志, 焦亚男, 谢军波, 等. 纺织复合材料纤维预制体力学性能测试方法研究进展 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(4): 1511-1533.

YANG Zhi, JIAO Ya'nan, XIE Junbo, et al. Research progress in testing methods of mechanical properties of textile composite fiber preforms[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(4): 1511-1533(in Chinese).

Keywords: textile composites; preform; mechanical properties; test method; deformation mechanism

纺织复合材料是由纤维预制体与基体材料复合固化而成的高性能材料。预制体纺织成型工艺包括编织、机织、针织、针刺和缝合等。根据复合材料的用途,可选用的纤维包括碳纤维、石英纤维、SiC纤维和聚四氟乙烯纤维等。纺织复合材料预制体可以是2D平面结构也可以是3D立体结构。3D高厚度预制体因存在贯穿厚度方向的纱线而具有很好的空间整体性,能够显著提高复合材料的层间性能。近年来,纺织复合材料以其优异的力学性能在航空航天、海洋船舶、军事、建筑、车辆工程、医学和体育等领域得到广泛应用,人们对大尺寸、复杂外形的复合材料结构件也提出了更多的需求^[1]。

预制体的纤维结构对复合材料的力学性能有着决定性的影响。预制体是一种柔性的织物骨架,在复合固化之前容易受到模具的挤压而发生变形,例如发动机叶片预制体的扭转变形、厚度压缩和飞行器罩体预制体的正负曲率转化等。预制体变形过程中可能会产生褶皱缺陷,造成纤维取向、体积含量和孔隙结构的急剧变化。利用Micro-CT技术可以清晰地发现复合材料的纤维构造与初始设计的理想结构存在明显差异,这些微细观结构的变化将对复合材料的最终性能产生重要影响^[2-3]。

准确控制预制体的外形尺寸和内部纤维结构的均匀性,实现“准确控形”,是保障复合材料构件力学性能可靠性和稳定性的重要前提。预制体的内部纤维构造和可变形性能(即适形性能)与纺织工艺参数密切相关。试验测试是表征预制体力学特性最直接的方法,基于试验数据可以进行工艺方案设计,优选出合理的织造参数,包括纱线细度、经/纬纱密度、纱线层密和交织点分布规律等。为了充分研究预制体的变形过程,人们提出了不同的理论模型,对变形过程进行模拟。其目的在于预测预制体变形后的几何形态、判断褶皱缺陷是否发生,以此评价其适形性能^[4-5]。这些模型主要包括运动学模型、宏观连续介质模型、细观单胞模型和虚拟纤维模型等。预制体的试验数据是建立上述分析模型的基础。

目前,针对复合材料已具有较完备的测试标准可供参考,但针对复合材料预制体(尤其是3D高厚度预制体)的力学试验仍缺乏成熟、系统的测试标准。现有的预制体的试验方法主要借鉴于

复合材料测试标准或早期服装面料的测试方法^[6-8]。预制体工艺参数多、可设计性强,采用不同纺织工艺制备的预制体在几何外形、纤维构造和力学性能方面都存在很大差异,现有的测试方法只适用于特定结构的预制体,很难获得广泛的应用。本文结合国内外最新研究进展,依次对纺织复合材料预制体的拉伸、压缩、弯曲、剪切和成型试验等基本力学测试方法进行了综述,总结了各种测试方法的主要参数、试验原理、适用条件及优缺点。以期 of 预制体力学测试技术的改进、测试标准的建立和成型过程中的准确控形提供理论指导,对纺织复合材料的结构设计和工程应用起到推动作用。

1 拉伸试验

拉伸强度和断裂伸长率是反映预制体拉伸性能的两大重要指标,它们是由纤维本身的性能及编织工艺参数决定的,了解工艺参数对预制体拉伸性能的影响规律至关重要^[9-10]。目前,常见的预制体拉伸测试方法主要有单轴拉伸和双轴拉伸。

1.1 单轴拉伸

织物单轴拉伸测试方法的研究较成熟,已有公认的一些测试标准,如ASTM D5035^[11]和ISO 1421^[12]等。目前预制体拉伸测试的最重要环节是试样的夹持固定,夹具夹紧力过大会导致试样过早断裂、夹紧力过小会造成试样滑脱。夹持过程还应保障试样中心线和加载方向的“对中”,防止拉伸载荷“偏心”产生误差。与2D织物相比,2.5D角联锁机织、3D正交机织和3D编织等织物具有较大的厚度,夹持力容易导致厚度压实和夹持端的褶皱,实现高厚度预制体的有效夹持存在较大的困难。Abtew等^[13]为了避免3D预制体拉伸过程中发生滑移,对试样两端50 mm区域内使用树脂进行固化处理。尽管局部固化能显著增加高厚度试样的夹持力、防止滑脱,但由于树脂沿纱线逐渐浸润,固化区域的边界与夹持钳口不平整,导致拉伸过程中纱线无法同时伸直,影响试验结果的准确性。拉伸过程中预制体表面的变形和变形恢复状态主要通过图像法^[11]测量。由于织物表面的不连续性,特别是纱线较粗、经/纬纱密度较低的预制体,通过数字图像相关(DIC)技术自动计算的应变场往往是不连续的。因此,大部分图像法仍然需要手动进行图像处理,增加了试

验成本。

1.2 双轴拉伸

相比于单轴拉伸，预制体双轴拉伸测试的相关研究较少，现有报道的双轴拉伸测试方法大多参考了1995年的MSAJ标准^[12, 14]。目前常见的2D双轴拉伸试样的形状、加载方式和应变测量方法等细节各不相同，表1总结了多种测试方法的关键参数。早期的双轴拉伸试样均为2D织物且形状为完整的十字形。在后来的试验中发现，由于试样夹持装置无法同时均匀夹持试样臂中的每一列纱线，导致十字形试样内应力分布不均匀，进而引起试样臂产生褶皱并先于中心区域发生破坏。因此，学者们相继提出了许多改进措施来消除这一现象：(1)将试样臂与设备连接方式由夹持式连接改为套筒式连接^[15](图1(a))；(2)在试样中心或试样臂上割出几条一定长度的切口，避免试样臂发生起皱^[12](图1(b))；(3)沿加载方向将试样臂分割成多个小条，以分列夹持代替整体夹持^[16](图1(c))。为了使试样的破坏发生在中心区域，Shi等^[17]采用方法(2)和(3)对试样进行改进，该试验使用的试样由上下两层粘贴而成：基层为十字形，表层为中心开口十字形。基层与表层粘贴在一起，通过圆辊连接在试验机上。试验结果证实了该改进方法能有效加强试样臂，使试样的破坏发生在中心区域。

双轴拉伸试验的加载方向通常是正交的，但Bridgens等^[16]使用改进的双轴拉伸设备实现了非正交双轴拉伸，该设备的上机架为浮动状态，可沿任意方向加载(图1(d))，这为织物的非正交双轴拉伸提供了可能。双轴拉伸载荷的实现方式主

要分为2种：(1)直接在2个方向布置伺服电机，实现双向加载；(2)利用连杆机构将面外的单向载荷转化为面内的双向载荷^[19]。双向加载方法对2个方向载荷的协同控制要求较高，容易产生误差。单向加载方法可以消除2个方向的载荷不同步问题，但对加载装置的加工精度要求较高，连接位置的摩擦会对载荷的测量带来误差。预制体双轴拉伸试验的应变测量方法主要分为2大类：(1)基于线性位移传感器^[16]和针式引伸计^[14-15]等装置的接触式测量，该方法操作方便，但测量装置与试样的接触会引入误差；(2)基于高速摄像机^[12, 17]和DIC应变测量系统^[18]等装置的非接触式测量，该方法测量精度高，但对拍摄装置的要求很高。综上所述，双轴拉伸试验的具体实施方法各不相同，用不同方法获得的试验数据往往不具有可比性。如何建立统一的双轴拉伸测试方法或有效的数据归一化方法有待进一步研究。此外，随着3D预制体的快速发展和应用，在2D预制体双轴拉伸测试方法的基础上开发出适合3D高厚度试样的测试方法显得十分必要。

2 压缩试验

复合材料固化成型前往往要将纤维预制体进行厚度压实，预制体通过压缩变形一方面提高纤维体积分数，另一方面使其外形达到预定形状和尺寸。预制体压缩变形由一系列微观结构变形构成，包括局部纤维取向、体积分数、空隙结构的变化及纱线的相互挤压等。对于2D织物(如平纹、斜纹、缎纹)铺层预制体，厚度的压缩会引起“Nesting效应”，即某一层织物内的纱线会被

表1 双轴拉伸测试的试验参数
Table 1 Experimental parameters of biaxial tensile test

Material	Sample center size/mm	Sample arm size/mm	Strain measurement method	Loading method	Ref.
Coated woven fabrics	700×700	260×100	135 mm linear displacement transducers	Biaxial bidirectional loading	[16]
Coated woven fabrics	300×300	150×25	100 mm linear displacement transducers	Biaxial unidirectionalloading	[16]
Non-crimp 3D orthogonal woven reinforcement	60×60	145×60	Digital image correlation (DIC)	Biaxial bidirectional loading	[18]
URETEK3216LV	160×160	200×160	28 mm needle extensometers	Biaxial unidirectional loading	[14]
Envelope material	50×50	200×50	High-precision displacement sensors	Plane loading of vertical specimen	[19]
HAA envelope	100×100	220×100	High-speed photography	Biaxial bidirectional loading	[12]
Urettek5876	160×160	160×200	20 mm needle extensometers	Biaxial bidirectional loading	[15]

Note: HAA—High altitude airship.

表2 压缩测试的试验参数

Table 2 Experimental parameters of compression test

Material	Top plate	Sample size/mm	Speed/(mm·min ⁻¹)	Strain measurement method	Ref.
Spacer fabric	Not mentioned	100×100	12	Micro-CT	[30]
Hexcel G986 twill 2/2 carbon fabric	Diameter: 100 mm	—	0.5	Micro-CT	[23]
Interlock fabric	Not mentioned	100×100	1	Digital microscope VHX-1000	[21]
2/2 twill weave fabric	Not mentioned	100×100	0.5	Micro-CT	[31]
Single layer fabric	Surface areas: 15 cm ²	50×50	1	Micro-CT	[22]
Woven and knitted fabrics	Diameter: 100 mm	140×140	1	High resolution microscope	[24]
Carbon fibre plain weave	Diameter: 50 mm	60×60	1	Imetrum video gauge system and Micro-CT	[32]

研究不同黏结剂含量对碳纤维预制体压缩和松弛过程的影响。压缩试验分为压缩、松弛和恢复3个阶段：压缩阶段，压头以1 mm/min的恒定速度对预制体进行压缩，直到压力达到设定的0.25 MPa；松弛阶段，压头在10 min内维持不动，以确保预制体内应力得到释放；恢复阶段，压头从原来的静止状态以120 mm/min的恒定速度提升。试验结果表明黏结剂的加入能显著提高织物的松弛能力。

为了研究纤维预制体的压缩变形机制，需要实时或者间断的获取压缩状态下预制体的内部几何形态。Mahadik等^[25-26]设计了一种树脂传递模塑成型(RTM)模具(图2(a))，通过向模腔中加入不同厚度垫片的方式改变样件的纤维体积含量，利用Micro-CT技术分析了3D角联锁预制体内部纱线路径和基体的孔隙形态。蒋建军等^[27]采用自制的试验装置(图2(b))，将玻璃纤维单向布铺放在上下模具中，以0.1 mm/min的速度在万能试验机上加载至6.4 kN压缩载荷，然后完成预制体的复合固化，研究了嵌套效应对单向织物铺层复合材料压缩性能的影响。Vernet等^[21]采用自主设计的RTM装置(图2(c))将压缩后的预制体试样锁紧并完成复合固化，利用数码相机对织物压缩后的变形进行细观观测与分析。上述观测过程需要对预制体进行树脂固化处理，过程比较复杂而且树脂的渗入会影响观测效果。Green等^[28]设计了一种预制体压缩控形装置(图2(d))，该装置可装入大小约为90 mm×55 mm的试样，通过螺栓紧固将试样压缩至所需的厚度，然后直接利用Micro-CT技术获取织物内部纱线屈曲路径、截面形状及其在压实过程中的演化过程等几何信息。

虽然压缩试验方法简单、易操作，可以根据需要设计不同的速度和压力研究预制体的压缩变形行为，但目前的压缩试验方法还无法实时获取

压缩过程中预制体内部纤维结构的变化。采用Micro-CT原位表征技术^[29]研究预制体的压缩变形过程是未来发展的趋势。

3 弯曲试验

弯曲变形是复杂结构复合材料预制体模压成型过程中常见的一种变形模式。抗弯刚度是描述预制体抵抗弯曲变形能力的重要指标，且预制体的抗弯刚度对褶皱缺陷的发生有重要影响，较大的抗弯刚度往往会增加起皱的数量和尺寸。与金属、复合材料等连续材料相比，预制体的弯曲变形机制十分复杂，在宏观尺度上主要表现为横向剪切和局部横向压缩，在细观尺度上主要表现为纱线的相对滑移和屈曲。预制体纤维之间没有基体粘接，其弯曲刚度远远低于复合材料。此外，预制体的非连续性结构导致其弯曲刚度与平面内拉伸模量没有直接关联，因此传统的板壳理论中拉伸刚度和弯曲刚度之间的关系不再适用。为了深入研究预制体的弯曲性能，必须通过试验手段准确表征其弯曲力学行为。目前的弯曲测试方法主要包括3种：悬臂梁法、三点弯曲法和Kawabata弯曲法^[33-34]。

3.1 悬臂梁法

悬臂梁法试验装置简单、易操作。悬臂梁弯曲法最早由Boisse等^[34]提出，其示意图如图3(b)所示，矩形织物样件在上接触板的带动下沿着平面缓慢向前移动，样件在重力作用下发生弯曲，当接触到斜面时停止试验。最早的悬臂梁试验假设试样所受弯矩和曲率之间的关系是线性的，抗弯刚度可通过下式进行计算：

$$G = \frac{wl^3 \cos \theta / 2}{8 \tan \theta}$$

(1)

其中： G 为单位宽度试样的抗弯刚度； w 为试样单位面积质量； l 为弯曲部分长度； θ 为斜板与水

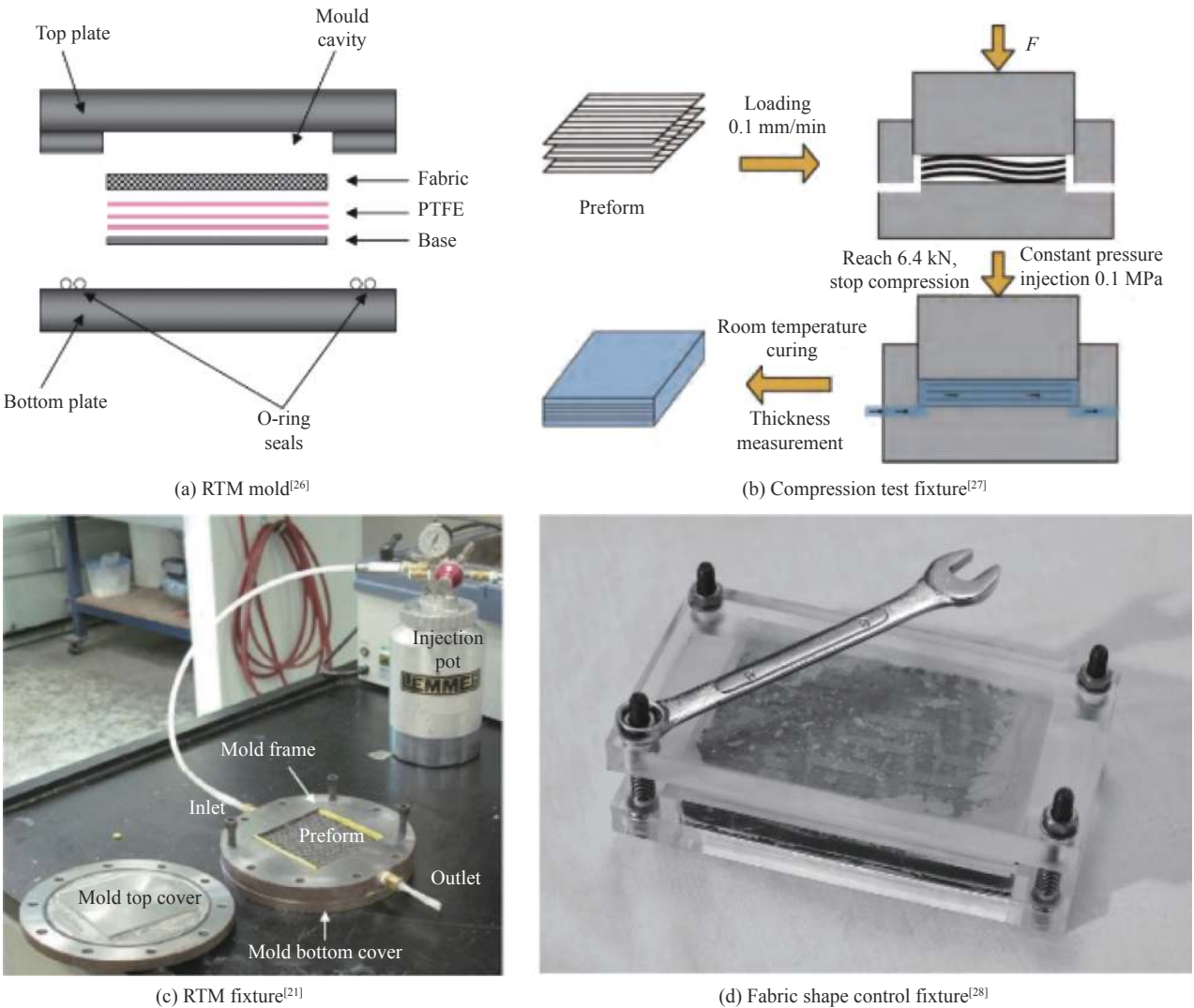


图2 压缩试样的控形方法

Fig. 2 Test method for shape control of compressed specimens

平线之间的夹角。为了便于计算，后来的 SÜLE 等^[35]、GATOUILLAT 等^[36]、BILISIK^[37]和 YU 等^[38]将斜板的角度定为 41.5°，从而使抗弯刚度 $G = w l^3 / 8$ 。

研究表明，传统的悬臂梁弯曲法存在一些缺陷。2014 年，Lammens 等^[39]发现使用传统的悬臂梁试验方法计算的抗弯刚度由于忽略了高阶效应会造成严重误差(高达 72%)。基于此，该作者提出了一种考虑高阶效应的改进计算方法，显著提高了抗弯刚度的计算精度。传统悬臂梁试验的小变形假设对其在高曲率弯曲测试中的应用产生了限制。Bilbao 等^[40]基于悬臂梁法提出了一种能够测试非线性、高曲率弯曲性能的试验方法。试验所用装置(图 3(a))主要包括机械和光学两部分，机械部分能够使样品自由端在重力作用下悬垂，

也可在样品自由端悬挂一定质量的砝码以实现更大曲率的弯曲；光学部分使用数码相机拍摄试样弯曲的形状，经过图像处理实现试样弯曲曲率的计算。基于 Bilbao 的试验方法，Liang 等^[41]采用图 3(c)所示的装置对干态的 2D 织物、3D 铺层织物和 3D 机织物进行了弯曲试验，采用 CCD 摄像机拍摄弯曲变形过程，选用均匀四次 B-样条曲线拟合试样弯曲形态并计算曲率。为了研究预浸料的弯曲变形行为，Liang 等^[42]还提出了一种带有环境室的悬臂梁试验装置，可以控制测试环境温度，对热塑性预浸料的弯曲行为进行表征。传统悬臂梁试验中的预制体由于悬垂过程中的非线性载荷效应可能会出现扭曲现象，针对这一问题，SHERWOOD 等^[43]提出一种垂直悬臂梁法。该方

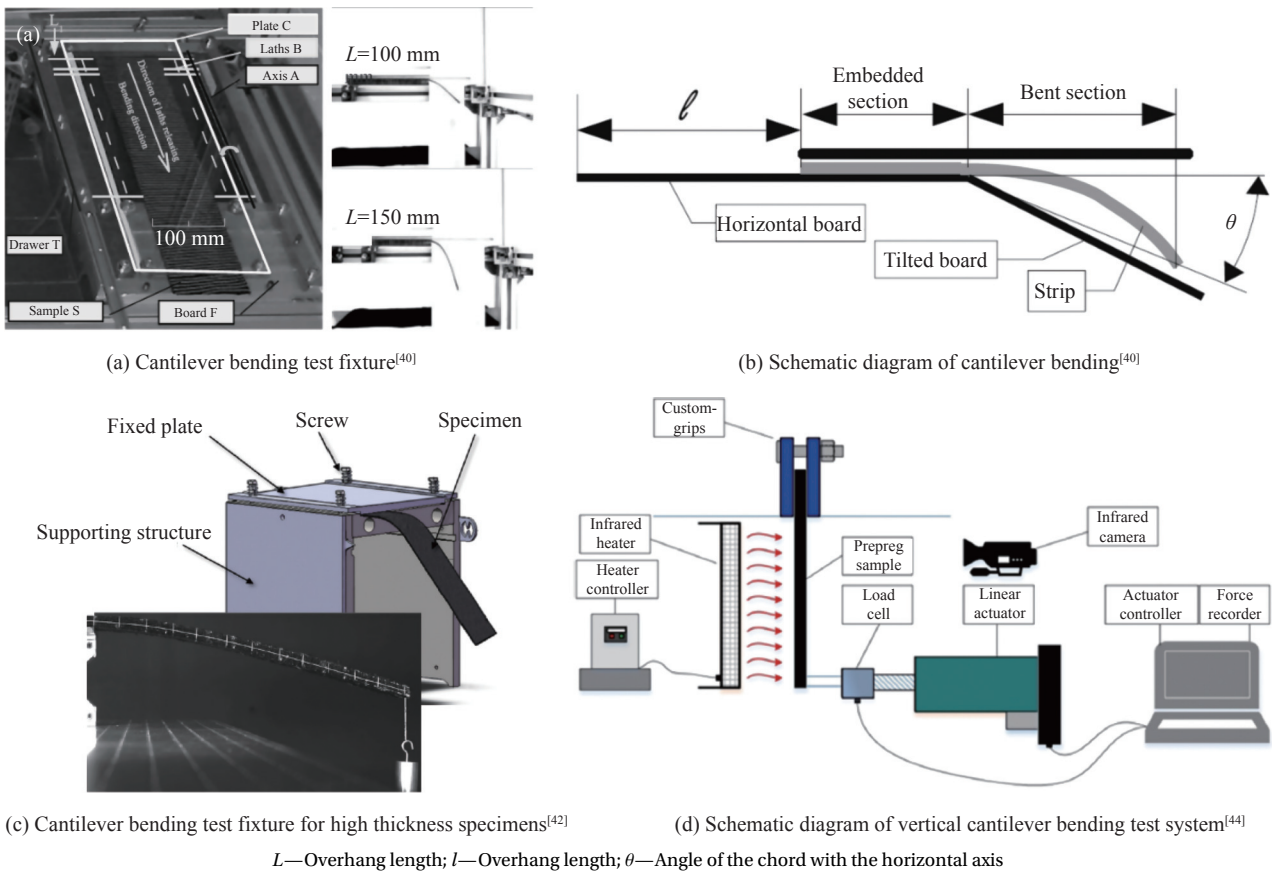


图3 悬臂梁弯曲试验

Fig. 3 Cantilever bending test

法将干态预制体竖直悬挂，通过绑在试样自由端的绳子来施加载荷，使用数码相机记录试样的位移并计算弯曲曲率。基于此方法，Alshahrani 等^[44-45]使用图 3(d) 所示的带有辐射加热的试验装置测试了热塑性预浸料在高温条件下的弯曲行为，揭示了材料的速率依赖性和黏弹性特性。

悬臂梁法是一种具有诸多优点的表征预制体弯曲性能的测试方法。一方面，悬臂梁法操作简单、适用范围广泛，可用于测试 2D 织物、3D 缝合织物和 3D 机织物等多种预制体，还适用于预浸料的弯曲测试；另一方面，悬臂梁法结合光学测量技术可以方便、精确的测量试样的弯曲变形。然而，悬臂梁法计算抗弯刚度误差较大，且高厚度预制体很难在自身重力作用下发生较大曲率的弯曲，需要人为施加一定的附加载荷，导致容易造成较大误差。表 3 总结了一些学者进行悬臂梁弯曲测试的试验参数。

3.2 三点弯曲法

预制体的三点弯曲测试方法借鉴了复合材料的测试标准^[54]，该方法主要适用于具有较大厚度

和弯曲刚度的试样。表 3 总结了一些文献进行三点弯曲测试所使用的试验参数。Charmetant 等^[49]、Liang 等^[46]和 Boisse 等^[53]使用三点弯曲法对 3D 碳纤维层层角联锁预制体的弯曲行为进行了测试，通过光学图像记录弯曲变形前后预制体厚度的变化(图 4(a))，利用图像处理技术计算不同弯曲挠度下试样的曲率。试验表明，由于纱线的抗拉刚度较大，试样的变形主要由横向剪切引起，且变形后原来与试样厚度截面中线垂直的法线不再与截面中线垂直。Margossian 等^[48]采用三点弯曲法研究了热塑性预浸料的弯曲行为，利用动态机械分析系统(DMA)配套的弯曲夹具进行了跨距为 20mm 和 50 mm 的三点弯曲试验，试验装置如图 4(b) 所示。由于 DMA 测试时无法对试样的变形过程进行拍摄或录像，因而试样的曲率只能在欧拉-伯努利理论的基础上采用解析法进行计算。这种可以控制测试环境温度的试验方法也受到其他学者的青睐^[50]。综上所述，三点弯曲法非常适合表征高厚度 3D 预制体的弯曲变形行为。但该方法在测试过程中难以保证试样发生均匀的曲率变化，且

表 3 弯曲测试的试验参数
Table 3 Experimental parameters of bending test

Material	Test method	Sample size/mm	Speed	Temperature/℃	Ref.
Four structural carbon fiber fabrics	Cantilever test	300×300	Quasi-static	No	[37]
Monoply and multiply stitched fabric	Cantilever test	300×150	Quasi-static	No	[40]
Monoply/multiply and 3D carbon fiber fabric	Cantilever test	Monoply: 150/180×50 Multiply: 100×50 3D: 405×70×15	Quasi-static	No	[41]
PPS-carbon satin prepregs	Cantilever test	200×50	Quasi-static	320, 345, 360, 380	[46]
UHMWPE fiber reinforced TPU	“Vertical” cantilever test	250×20	Quasi-static	80, 100, 120	[47]
5HS satin weave impregnated with Cycom 5320	“Vertical” cantilever test	150×50	3, 6, 9 mm/s	20, 50, 70, 90	[44]
Unidirectional carbon fiber reinforced PA6	Cantilever/ three-point test	23×15,53×15 Span: 20/50	0.01, 0.1, 0.5 mm/min	200, 230, 260	[48]
Interlock reinforcement	Three-point test	200×30×15 Span: 116	—	No	[49]
Glass fiber twill/UD prepreg	Rheometer test	15×20	0.1, 1, 10 r/min	60, 150, 210, 220, 260	[50]
Unidirectional carbon fiber reinforced Nylon 6	Rheometer test	(25-35)×25	0.6, 6, 19.2, 60 °/s	240, 26, 280	[51]
Carbon fiber plain weave fabric and Silicone oils	Rheometer test	60×70	0.1, 1, 10 r/min	No	[52]

Notes: PPS—Polyphenylene sulfite; TPU—Thermoplastic polyurethane; UHMWPE—Ultrahigh molecular weight polyethylene; UD—Unidirectional.

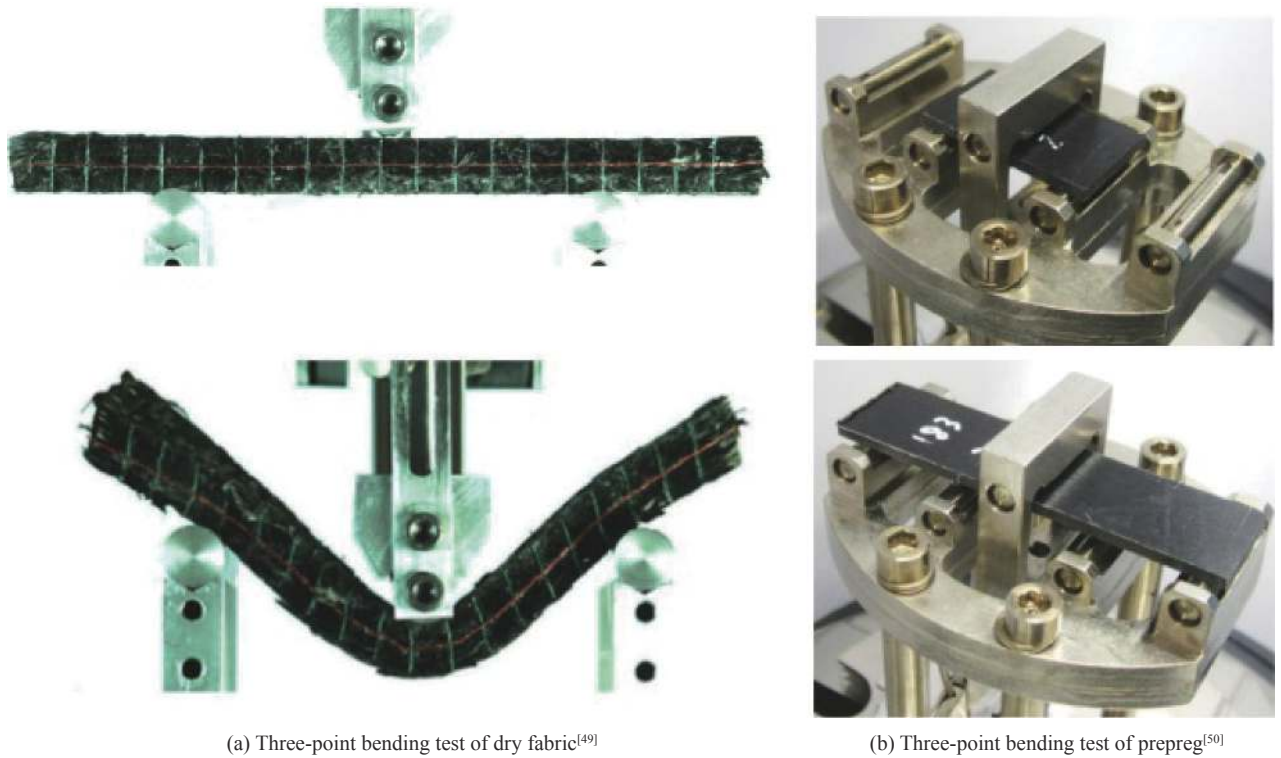


图 4 三点弯曲试验

Fig. 4 Three-point bending test

高温环境中仅能在较小的挠度范围内进行测试，导致无法精确获取试样变形后的真实曲率。

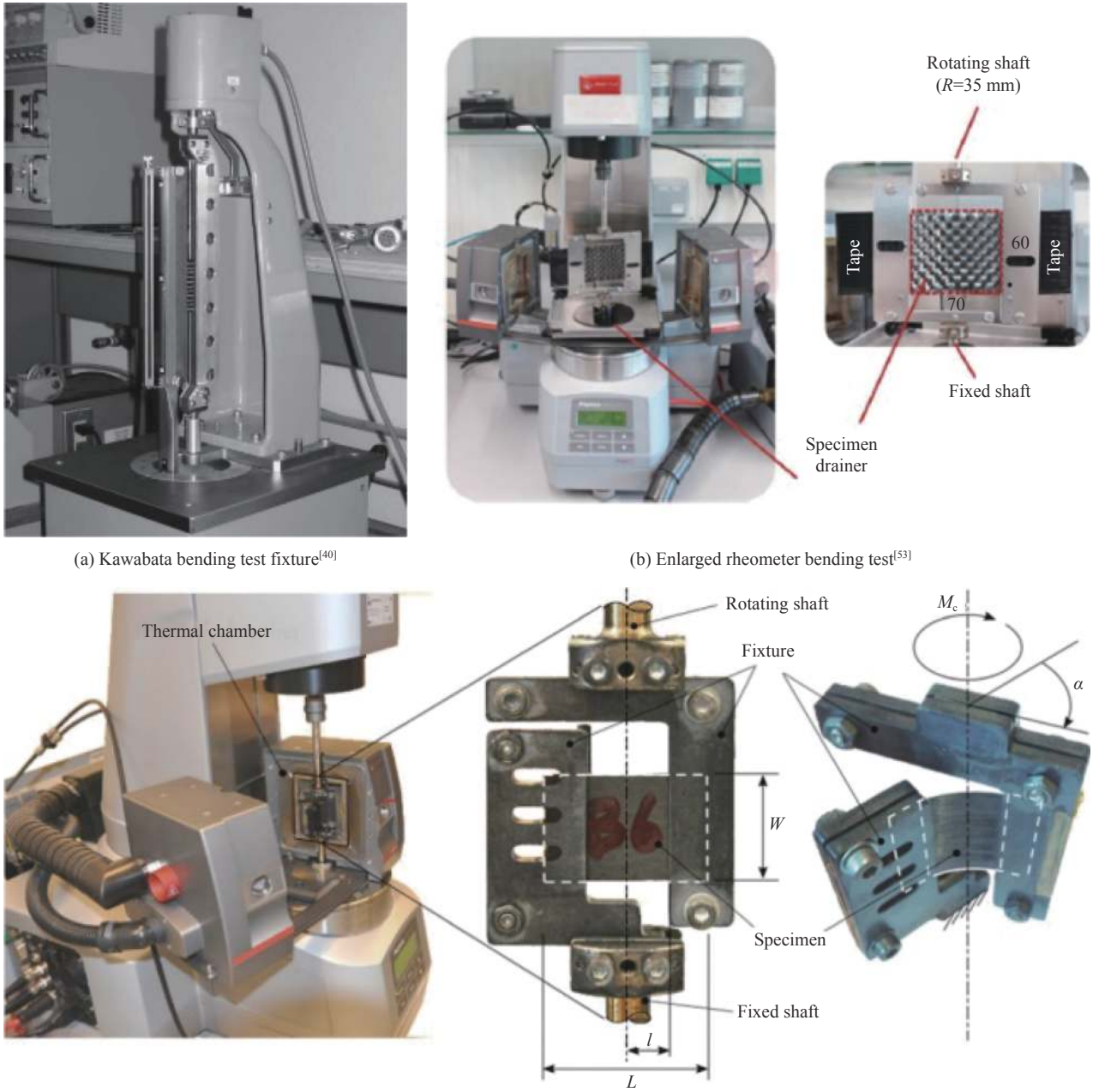
3.3 Kawabata 弯曲法

Kawabata 弯曲试验 (KES-FB2) 起于 1980 年，其测试装置^[40]如图 5(a) 所示，预制体在试验装置

中的夹持方式确保了试样的纯弯曲变形，但试样夹持时应尽可能减小夹具与试样之间的摩擦以免增大弯矩。KES-FB2 不仅能够测试预制体在纯弯曲变形模式下的力学性能，还可以直接获取试样单位宽度弯矩随曲率变化的曲线。采用该方法进

行弯曲循环加卸载试验可以发现, 预制体弯矩-曲率曲线呈现较强的非线性, 这种试验结果和循环加载方式是悬臂梁和三点弯曲试验无法实现的。为了能够在高温环境下研究预制体或预浸料的弯曲行为, 有学者^[50-51]在 KES-FB2 的基础上开发了一种流变仪弯曲试验装置 (图 5(c)) 和测试方法, 该装置结合自制的预制体夹具和流变仪可以实现摆动式旋转加载, 这种加载方式同样能够确保试

样发生纯弯曲变形。表 3 总结了一些文献进行流变仪弯曲测试所使用的试验参数。流变仪弯曲测试可以严格控制试验过程中的温度和弯曲速率, 能够快速和有效表征预制体弯曲刚度对温度和加载频率的依赖性。由于较粗纱线的试样测试时包含的纱线交织点较少, Poppe 等^[52]在上述方法的基础上, 增大了夹持装置 (图 5(b)) 的尺寸, 提高了试验的可重复性, 但该方法由于夹持装置尺寸



W —Specimen width; L —Total length of specimen; l —Half effective length of specimen; M_c —Bending moment; α —Rotation angle

图 5 Kawabata 弯曲试验及其扩展

Fig. 5 Kawabata bending test and its extensions

较大，不能研究高温条件下预浸料的弯曲变形行为。综上所述，尽管流变仪弯曲测试具有温度/速度可控和纯弯曲变形等诸多优点，但该方法受到加载方式和试样夹持装置的限制，难以用于测试大尺寸和高厚度的预制体。

4 剪切试验

剪切变形是纺织复合材料预制体固化成型过程中最主要的变形模式。预制体的剪切变形可以分为面内剪切和面外剪切 2 类，目前的研究主要集中在较薄预制体的面内剪切^[55-57]，针对 3D 高厚度预制体的层间剪切研究^[49, 58]较少。剪切试验的载荷-剪切角曲线一般可分为 3 个阶段^[59]：初始阶段剪切变形主要表现为纤维束间的相互转动，此时面内剪切刚度较小；当剪切角变大时，纤维束间相互挤压，面内剪切刚度显著增加；当剪切角超过“锁紧角”时，剪切载荷急剧上升，试样产生面外褶皱。预制体产生褶皱主要有以下 2 个原因：(1) 预制体产生了沿纱线方向上的压缩(通常可以在成型过程中避免)；(2) 预制体发生了显著的

面内剪切变形。对预制体起皱机制的研究表明^[36, 60]，起皱和剪切角之间不是简单的线性关系，特别是预制体面内张力足够大时，即使在很大的剪切角下也可以避免起皱。因此，工程上希望通过深入研究预制体剪切变形与起皱的关联关系，为纺织复合材料预制体成型工艺设计提供指导。目前的面内剪切测试方法主要包括相框剪切和偏轴拉伸，面外剪切测试方法主要为层间剪切。

4.1 相框剪切

相框剪切试验 (Picture frame test, PFT) 是目前表征复合材料预制体面内剪切行为的常用方法之一^[61-64]。相框剪切原理如图 6(a) 所示，相框沿对角线方向受拉伸，由正方形变形为菱形。根据相框的运动学规律，可以计算出相框角 θ 与拉伸位移 d 之间的关系，如下式：

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{2}L + d}{2L} \right)$$

(2)

根据剪切角 γ_{frame} 与相框角 θ 之间的关系可以得到剪切角与拉伸位移之间的关系，如下式(L 为相

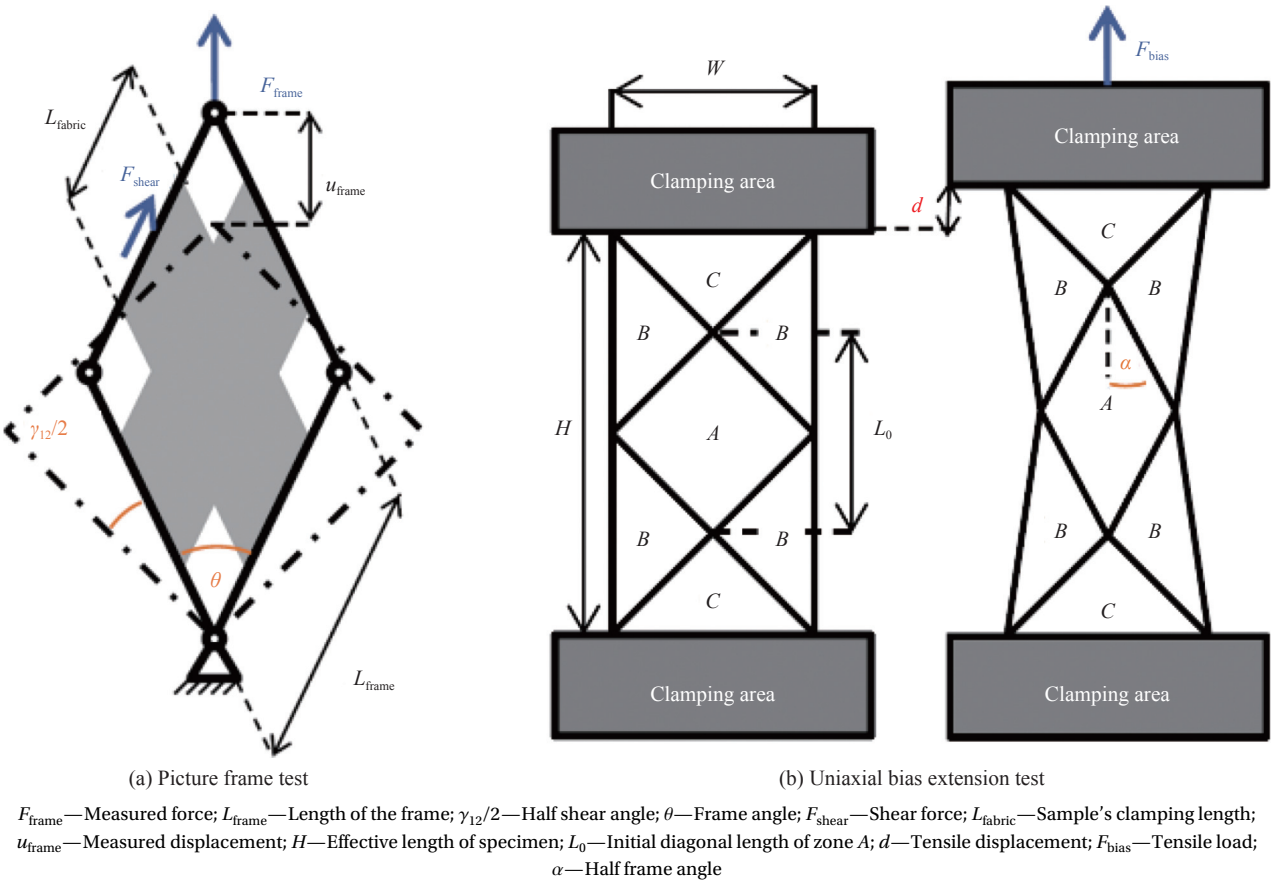


图 6 相框剪切和单向偏轴拉伸变形示意图^[61]

Fig. 6 Schematic representation of picture frame and uniaxial bias extension deformation^[61]

框边长):

$$\gamma_{\text{frame}} = 90^{\circ} - 2\theta = 90^{\circ} - 2\cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{2}L+d}{2L}\right) \tag{3}$$

理论上相框内的预制体将产生纯的、恒定的面内剪切变形，试验结果表明理论剪切角与真实剪切角的差异非常小，特别是在初始变形阶段^[65]。

相框剪切还没有统一的测试标准，表 4 总结了近年来文献报道的试验参数。最初的相框剪切装置(图 7(a))由 4 个等长的刚性杆铰接而成，杆的方向与织物纱线方向相同，为了防止织物从 4 个角起皱，将正方形试样的四角裁掉，制成十字形试样。为了保证织物的纯剪切运动，有学者^[66-67]在原有装置的基础上增加了一个扩大器，如图 7(b)所示，该方法能增加相框剪切运动的稳定性。预制体样件的外形、夹持方式和测试工装的精密性都会影响测试结果，人们采取了一系列改进措施来提高测试的精确性，例如：在相框刚性杆之间使用轴承连接^[58]、使用带有橡胶防滑层夹具来夹

紧织物^[65]及抽除试样夹持臂中的横向纱线^[66-67]等。

罗锡林等^[66]发现，抽除夹持臂横向纱线后，夹持臂被简化为平行纱线，不会产生褶皱和剪切阻力，因此能提高了剪切载荷的测试精度。预制体的面内张力对剪切行为有重要影响，Hosseini 等^[60]在相框臂上垂直安装了 4 个伺服电机(图 7(c))，为织物的经纱和纬纱提供拉伸/压缩载荷。为了确保织物的纯剪切条件，测试过程中利用 Labview 控制伺服电机加/卸载运动以保持织物的纱线张力始终为零。Zhang 等^[58]发现，如果预制体样件在初始安装时的经/纬纱方向与相框臂不平行，随着剪切角度的变化，会导致纱线的局部张紧或松弛，在夹持端附近产生褶皱，为了保证剪切测试的可重复性，必须确保试样的准确夹持。但由于织物(尤其是 3D 高厚度织物)的柔性特征，无论如何调整夹持位置、控制纱线张力，夹持臂部位的纱线总是容易发生弯曲和倾斜，影响试验的可重复性。因此，基于相框剪切原理，Montazerian 等^[57]

表 4 相框剪切测试的试验参数
Table 4 Experimental parameters of picture frame test

Material	Sample size/mm	Speed/(mm·min ⁻¹)	Strain measurement method	Ref.
3D angle interlock fabric	100×100	10	Manual image analysis	[58]
Non-crimp 3D orthogonal weave preform	180×180	10	Digital image correlation (DIC)	[18]
Plain-woven Kevlar® 49	75×75 100×100 125×125	5	CCD camera	[67]
NCFs with chain and tricot-chain stitches	210×210	20	1 230-pixel camera	[65]
Twintex fabric	219×219	—	Zeiss V20 stereo microscope	[62]
UD-NCF and Hexcel’s woven fabric	170×170	100	Two video cameras	[61]
F-12 aramid fabric	127×127	—	DIC	[66]

Note: NCFs—Non-crimp fabrics.

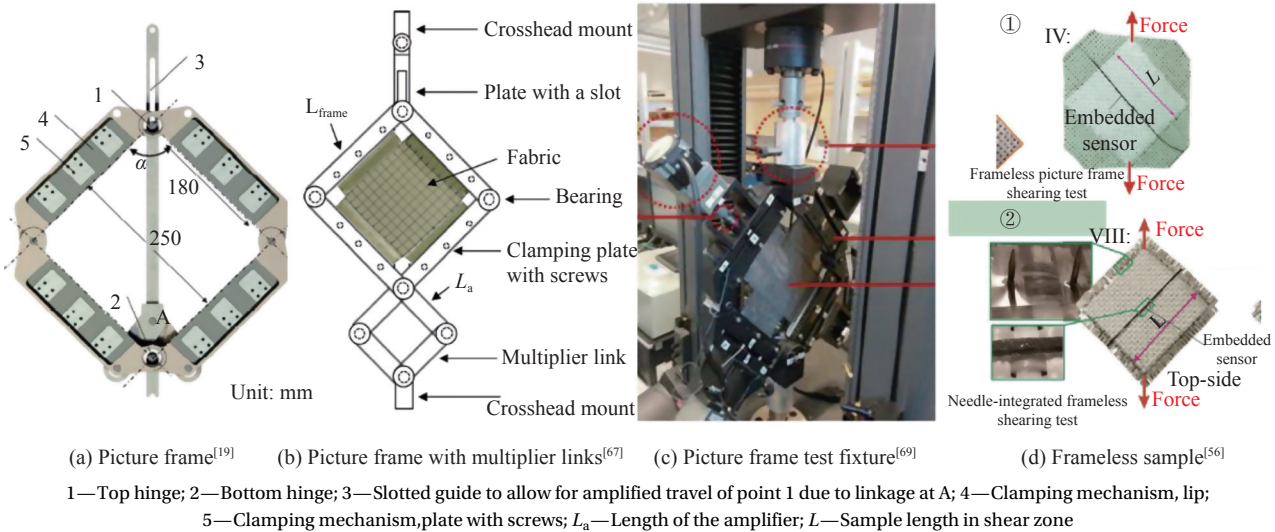


图 7 相框剪切试验

Fig. 7 Picture frame test

设计了一种无框剪切测试方法，将相框夹持臂设计为试样的一部分。提出了 2 种替代刚性夹持臂的方案：(1) 在中心区域之外对热塑性预浸料试样进行加热固化，形成剪切框架，然后裁掉四个角，对角拉伸试样，使其发生剪切 (图 7(d) 中的①)；(2) 固化出剪切框架后，平行于试样边缘裁切固化区域，用钉子穿透边界处的纱线组织点，边界另一侧用透明胶条夹紧，以固定钉子，然后对角拉伸试样 (图 7(d) 中的②)。无框剪切方法不需要相框夹具，最大限度地减少了由试验装置带来的误差。

不同研究团队采用的相框剪切装置和试验方法有所区别^[68]，这就导致不同试验结果之间的可比性较差。定义有效的归一化方法，对测试结果的评价和应用十分必要。目前受到广泛认可的归一化方法是基于能量法提出来的^[57,68]，归一化后的载荷 $F_{\text{normalized}}$ 计算方法如下式：

$$F_{\text{normalized}} = \frac{F - F'}{2 \cos \theta} \left(\frac{L_{\text{frame}}}{L_{\text{fabric}}^2} \right) \tag{4}$$

其中： F 是试验机记录的载荷； F' 是试验装置空载时的载荷； L_{frame} 为相框长度； L_{fabric} 为试样夹持臂宽度 (见图 6(a))。

4.2 偏轴拉伸

偏轴拉伸试验 (Bias extension test, BET) 是表征预制体面内剪切行为的另一种常用方法^[69]，按

照加载方式该方法又可以分为单向偏轴拉伸^[56,60,70-72]和双向偏轴拉伸^[73-74]。Boisse 等^[75]对预制体单向偏轴拉伸工作进行了综述。双向偏轴拉伸装置较复杂，相关研究较少。表 5 列出了近年来预制体进行偏轴拉伸所使用的试验参数。

单向偏轴拉伸因其制样和试验方法简单而广泛应用于纺织复合材料预制体面内剪切行为的研究^[56,70]。单向偏轴拉伸采用矩形试样，试样内部经/纬纱与拉伸载荷方向呈 $\pm 45^\circ$ ，为保证试样中心区域发生纯剪切变形，试样的长度至少为宽度的 2 倍。图 6(b) 为试样变形前后的示意图^[61]。矩形试样两端被夹具夹持，试样中间部分在拉力 F_{bias} 的作用下发生变形。基于纤维伸长率为零和交结点处无滑移旋转这 2 个基本假设，理论上可按照变形程度的不同将试样分为 A、B 和 C 3 个区域。其中，A 区纱线两端自由，主要发生纯剪切变形；B 区变形后的剪切角为 A 区剪切角的一半；C 区不发生变形。根据试样各区域的变形规律，可以计算出 A 区剪切角 γ_{frame} 随拉伸位移 d 之间的关系如下：

$$\gamma_{\text{frame}} = 90^\circ - 2 \cos^{-1} \left(\frac{H - W + d}{\sqrt{2}(H - W)} \right) \tag{5}$$

其中， H 和 W 分别为试样的有效拉伸长度和宽度。单向偏轴拉伸测试的试样夹持方式对测试精

表 5 偏轴拉伸测试的试验参数
Table 5 Experimental parameters of bias extension test

Material	Test method	Sample size/mm	Speed/(mm·min ⁻¹)	Strain measurement method	Ref.
4-harness satin weave fabric and epoxy resin	Bias extension test	225×90	20	DIC	[78]
Nylon 66 woven engineering fabric	Bias extension test	200×100	10	CCD camera	[56]
Non-crimp 3D orthogonal weave preform	Bias extension test	200×100	3	Digital camera	[18]
F-12 aramid fabric	Bias extension test	300×50	—	DIC	[66]
2×2 twill-weave carbon fabric	Bias extension test	200×100 300×150 400×200	200	Casio HS EX-ZR700 digital camera	[77]
NCFs with chain and tricot-chain stitches	Bias extension test	225×90	20	1 230-pixel camera	[65]
Roving glass fibre/polypropylene (PP)	Bias extension test	250×100	100,1 000 and 10 000	PHANTOM V711 high-speed camera	[80]
UD-NCF	Bias extension test	320×160	100	Digital video camera	[61]
Plain weave fabric	Bias extension test	100×50	10	DIC	[56]
Plain weave glass fabric	Biaxial bias extension test	210×210 240×240	200	Digital camera (Canon power shot A 700)	[73]
Twintex	Multi-step biaxial bias extension (MBBE) test	70×70	4	Creaform viuscan portable 3D scanner	[74]
12 K carbon plain weave woven fabric	Infiltrated bias-extension test (IBET)	280×120	100, 350, 700	A camera system	[79]

度有重要影响。罗锡林等^[66]通过在试样两端夹持部位粘贴铝箔,不仅增强了夹具对试样的夹持作用,还避免了加载过程中试样在夹具内发生破坏。在此基础上,Harrison等^[76]扩大了铝箔的粘贴范围(图 8(b)),使用环氧粘合剂将铝箔粘贴到试样的夹持部位及试样中理论上不发生变形的区域(图 6(b)中的 C 区)。该方法不仅可以在夹持区内钻孔时减少试样的变形和损坏,而且可以为 C 区边缘提供一个明确的“端部固定”边界条件,从而有效防止试验过程中 C 区的变形。试样的初始状态(预剪切和起皱)对单向偏轴拉伸测试精度也有重要影响^[71]。Harrison 等^[77]在 2018 年提出使用透明抗皱板来减少试样的起皱误差,将试样放置在 2 mm 间隔的抗皱板之间进行偏轴拉伸试验(图 8(b)),该方法可以显著提高试验的准确性和可重复性。

单向偏轴拉伸因其测试简单而被广泛用于高温环境下预浸料的面内剪切研究^[78]。Poppe 等^[79]设计了一种水平单向偏轴拉伸装置用于表征常温或高温环境下预浸料的面内剪切特性,试验装置如图 9(a)所示,试样安装完毕后转移到硅油槽内,试样水平浸润在硅油中,通过钢丝绳将试样与试

验机相连,实现水平加载。该试验可研究温度、流体粘度和加载速度等因素对试样面内剪切性能的影响,但是无法保证试样在流体中达到完全浸润,从而无法保证试验结果的稳定性。Aridhi 等^[55]利用恒温箱和万能试验机搭建了一套可在高温环境下进行单向偏轴拉伸的试验装置(图 9(b)),设计了一种带有螺丝和弹簧的特殊夹具。当预浸料中树脂温度达到熔点时,该夹具可以避免试样因厚度减小而发生滑动。Machado 等^[80]考虑试样内部温度分布的不均匀性设计了图 9(c)所示的试验装置,试验开始时利用温度探头监测试样内部的温度,待温度达到均匀稳定后关闭恒温箱并开始试验,研究了温度和成形速度对预浸料剪切行为的影响。试验结果表明实际成形过程中当成形速度很低(或成形时间很长)时,试样温度会显著下降,从而导致剪切刚度增大。

精确获取剪切试样的变形特征对得到正确的试验结果具有重要意义。数字图像技术因其操作简单、数据处理便捷和成本低等优点被广泛用于表征剪切试样的变形特征。Schirmaier 等^[61]采用数字图像法表征了偏轴拉伸试样的变形,试验除了在变形区的边缘使用白色示踪线(图 8(a)),还在试样中心喷涂 0.25 mm 间隔的正方形白点图案,通过数码摄像机记录白点的位移,使用 Matlab 程序分析每个点的变形情况。Alsayednoor 等^[71]研究了 3 种应变测量技术(人工图像分析技术、2D 及 3D 全场分析技术)对偏轴拉伸试样变形的测量精度。试验结果表明,当试样中存在预剪切或起皱时,手动图像分析和 2D 全场图像分析技术测量的剪切角过高(误差达到 20%),而采用 3D 全场分析技术可以修正预剪切带来的误差,即使在出现面外褶皱的情况下,也能提供准确的全场剪切角数据。

当面内剪切角达到“锁紧角”之后,纱线之间会发生横向挤压,此时拉伸对剪切试验结果的影响很大。研究表明拉伸-剪切耦合作用呈非线性^[81],而双向偏轴拉伸是一种测量织物拉伸-剪切耦合作用和起皱的有效方法。Harrison 等^[73]采用图 8(c)所示的简易双向偏轴拉伸装置研究了拉伸-剪切耦合对织物起皱的影响。该装置设计试样的纵向与万能试验机连接,横向与悬吊的重物连接。试验过程中横向悬吊重物的质量无法改变,仅能控制试样纵向的加载速度和位移大小。在此基础上,Rashidi 等^[74]设计了图 8(d)所示的双向偏轴

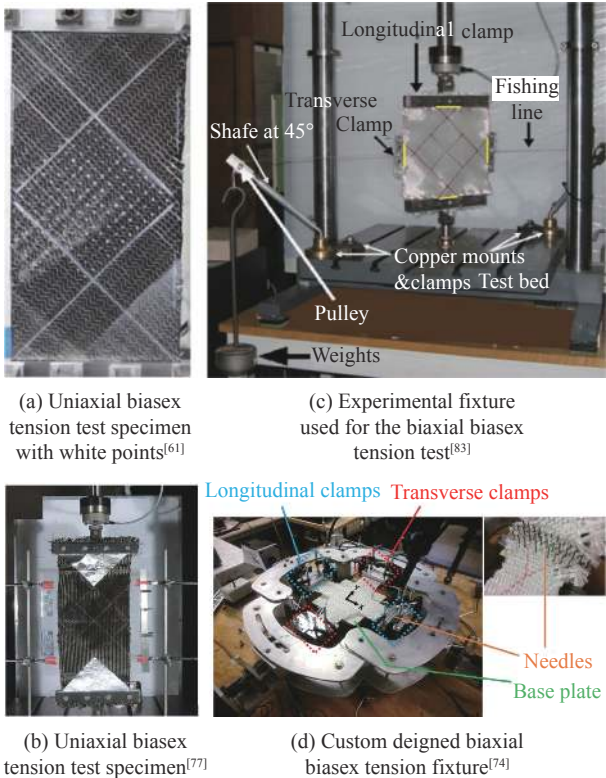
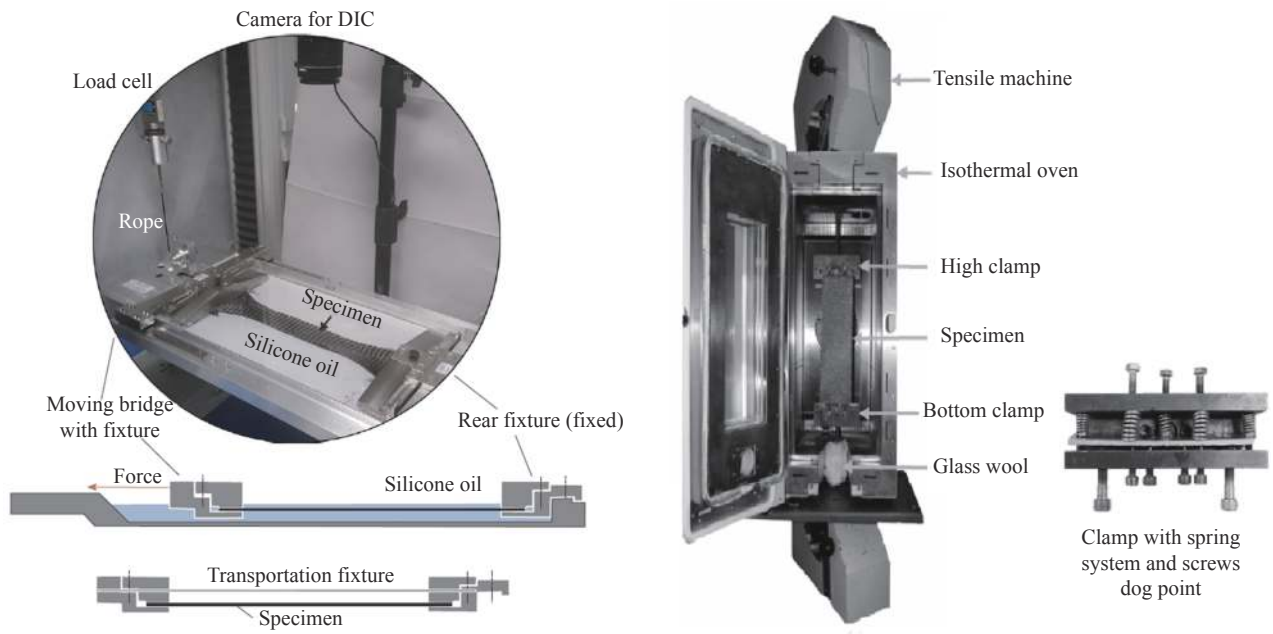


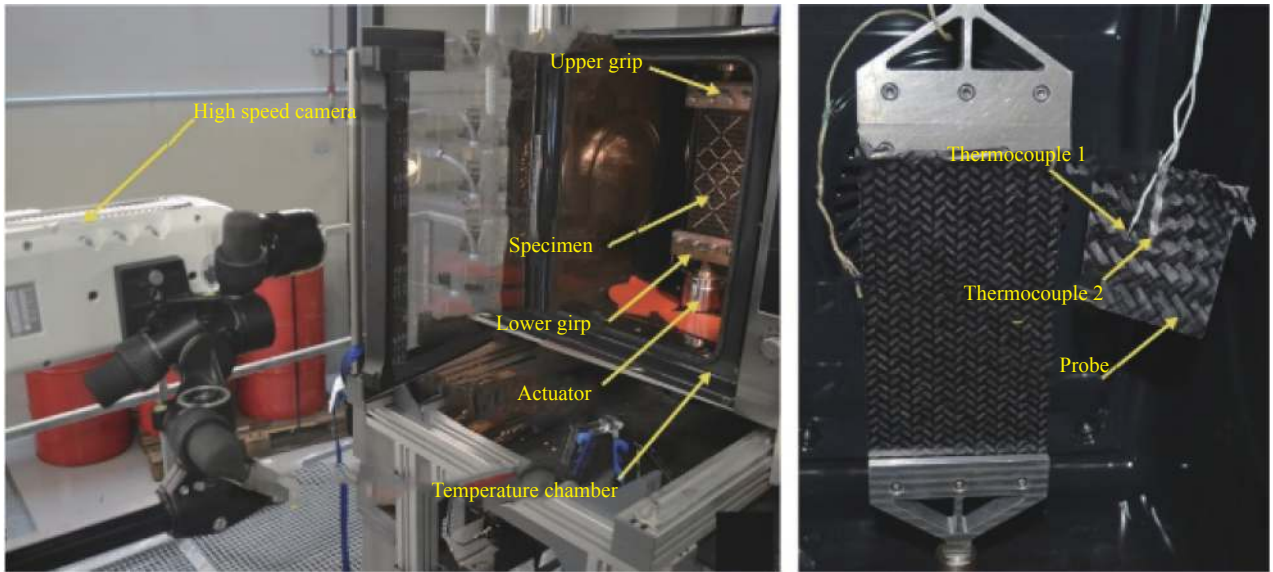
图 8 偏轴拉伸试验装置和试样

Fig. 8 Biax extension test fixture and specimen



(a) Horizontal bias extension test^[79]

(b) Bias extension test fixture and clamp system^[54]



(c) Bias extension test fixture and detail of temperature probe^[80]

DIC—Digital image correlation

图 9 高温下单向偏轴拉伸试验装置

Fig. 9 Uniaxial bias extension test fixture and specimen at high temperature

拉伸装置，该装置的双轴夹具采用水平设计，方便试样的安装，夹具与试样之间通过钉板连接。试验安装后，可通过自定义 4 个方向的加载顺序来研究起皱和去皱过程中试样内部纤维结构的变形特征。双向偏轴拉伸的试验结果表明，虽然横向预紧力对延迟起皱的影响明显，但在纱线上施加过大的横向载荷会导致纱线的成形窗口狭窄，

最终导致纤维断裂。

偏轴拉伸试验与相框剪切试验一样需要定义有效的归一化方法。目前，偏轴拉伸常用的将试验测得的拉伸力转换为剪切力的归一化方法也同样是基于能量法提出来的^[80, 82]。对于率无关的材料，归一化的剪切力 $F_{\text{normalized}}$ 可以通过下式进行计算：

$$F_{\text{normalized}} = \frac{1}{(2H - 3W)\cos\gamma} \left(\left(\frac{H}{W} - 1 \right) F \right. \\ \left. \left(\cos \frac{\gamma}{2} - \sin \frac{\gamma}{2} \right) - W \cos \frac{\gamma}{2} F_{\text{normalized}} \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right) \quad (6)$$

对于与率相关的材料，基于牛顿流体近似法可以通过下式进行计算：

$$F_{\text{normalized}} = \frac{\left(\frac{H}{W} - 1 \right)}{\left(2 \frac{H}{W} - 3 + 2X \right)} \frac{F}{\frac{\sqrt{2}W}{2}}, \\ X = \frac{1}{4} \left\{ \frac{\cos^2\gamma \left[1 + 3\sin^2\frac{\gamma}{2} \right]}{\cos^2\frac{\gamma}{2} \left[1 + 3\sin^2\gamma \right]} \right\} \quad (7)$$

其中： $\gamma = 90^\circ - 2\theta$ 为剪切角， θ 为纱线间夹角； F 为拉伸载荷； H 和 W 分别为试样的有效长度和宽度(图 6(b))； X 是剪切角与剪切速率的函数，对于受约束的牛顿流体模型， X 只与剪切角有关。

4.3 层间剪切

层间剪切是高厚度 3D 纺织复合材料预制体的一种重要变形模式。研究层间剪切性能对 3D 预制体的变形仿真和复合材料构件的成型工艺设计具有重要意义。Charmetant 等^[49]设计了图 10(a)所示的层间剪切装置用于测试角联锁织物的经向和纬向层间剪切性能。该装置将试样粘贴到两个平行的夹具上，采用圆柱销固定剪切的初始位置。对上夹具施加向上的载荷使试样发生剪切变形，通过观察试样厚度表面纱线的变形状态来检查剪切应变场的均匀性。由于剪切过程中 2 个平行夹具之间的距离固定不变，导致试样在试验过程中会受到拉剪耦合作用。针对这一问题，Zhang 等^[58]设计了一种新型层间剪切测试装置如图 10(b)所示，该装置在剪切试验过程中试样厚度方向是自由的，从而减小了试样的拉剪耦合作用。试验前将大小为 50 mm×40 mm 的试样通过强力胶粘牢在大小为 80 mm×60 mm 的两块平行铝板上，然后将带有试样的铝板插入测试夹具的凹槽中。通过对上夹具施加向上的剪切载荷，加载速度为 1 mm/min。采用上述装置通过细观结构分析可以研究 3D 预制体层间剪切变形的破坏机制。预制体的剪切强度 τ 可通过下式进行计算：

$$\tau = \frac{F}{lw} \quad (8)$$

其中： F 为试验机测得的载荷； l 和 w 分别为试样的长和宽。

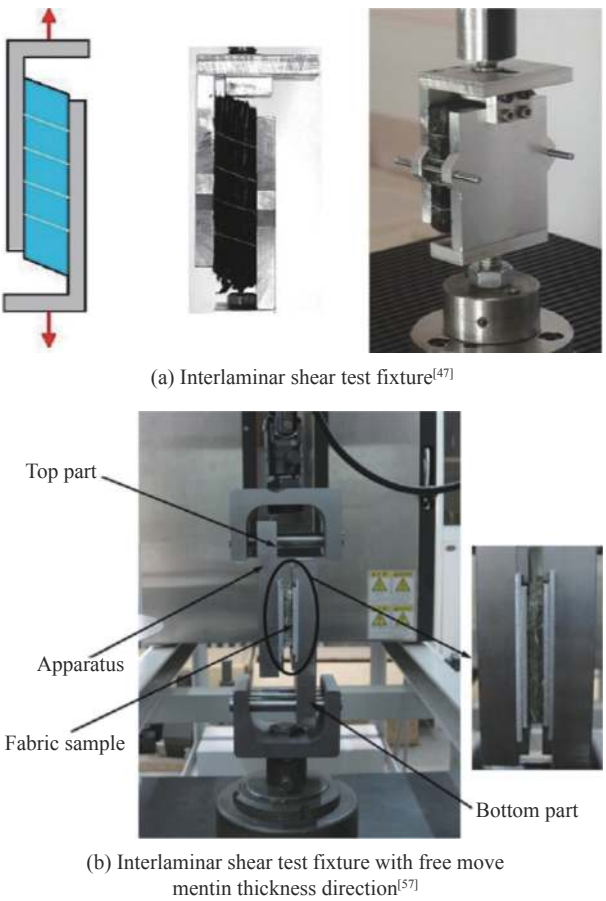


图 10 层间剪切试验装置

Fig. 10 Interlaminar shear test fixture

5 成型试验

采用干织物 RTM 工艺或预浸料热压成型工艺制备大尺寸、复杂外形结构件时，纺织复合材料预制体会由平面状态转化为复杂的几何形状，其内部纤维结构将发生较大的剪切和弯曲变形。在预制体成型过程中，褶皱是可能出现的主要缺陷之一，尤其使用多层织物进行成型时，如果铺层布之间具有不同的纤维取向，则褶皱出现的概率会大大增加^[83]。此外，预制体织造过程中的断纱或经/纬纱密度过小都会导致成型后经/纬纱之间出现显著滑移，容易造成最终复合材料的局部富含树脂，从而导致应力集中。预制体适应复杂构件外形的能力被称为“适形性能”。目前，人们大都采用半球成型试验来研究预制体的适形性能，是由于半球模具形状简单，能够使预制体变形为双曲率形态^[49]。还有学者采用其他复杂形状成型试验来研究预制体的适形性能，包括双穹顶成型、三角锥成型和方盒成型等复杂结构成型^[4, 84]。

5.1 半球成型试验

半球成型试验的主要目的是获取织物和纱线的局部变形信息，以研究预制体的变形和起皱机制。试验初始阶段，预制体内部纱线会绕组织点发生转动，产生剪切变形；随着预制体变形的增大，纱线之间发生相对滑动，预制体逐渐贴附在半球曲面上。最早的半球试验主要针对2D机织和针织等较薄的预制体，随着3D复合材料的广泛应用，近年来人们开始关注3D高厚度预制体的半球成型试验^[85-86]。表6总结了多篇文献报道

的半球成型试验参数，由于预制体试样的结构参数不同，相应的试验参数也有显著差异。根据冲头的冲压方向可将半球成型试验分为向上成型和向下成型2种，如图11(a)和图11(b)所示。

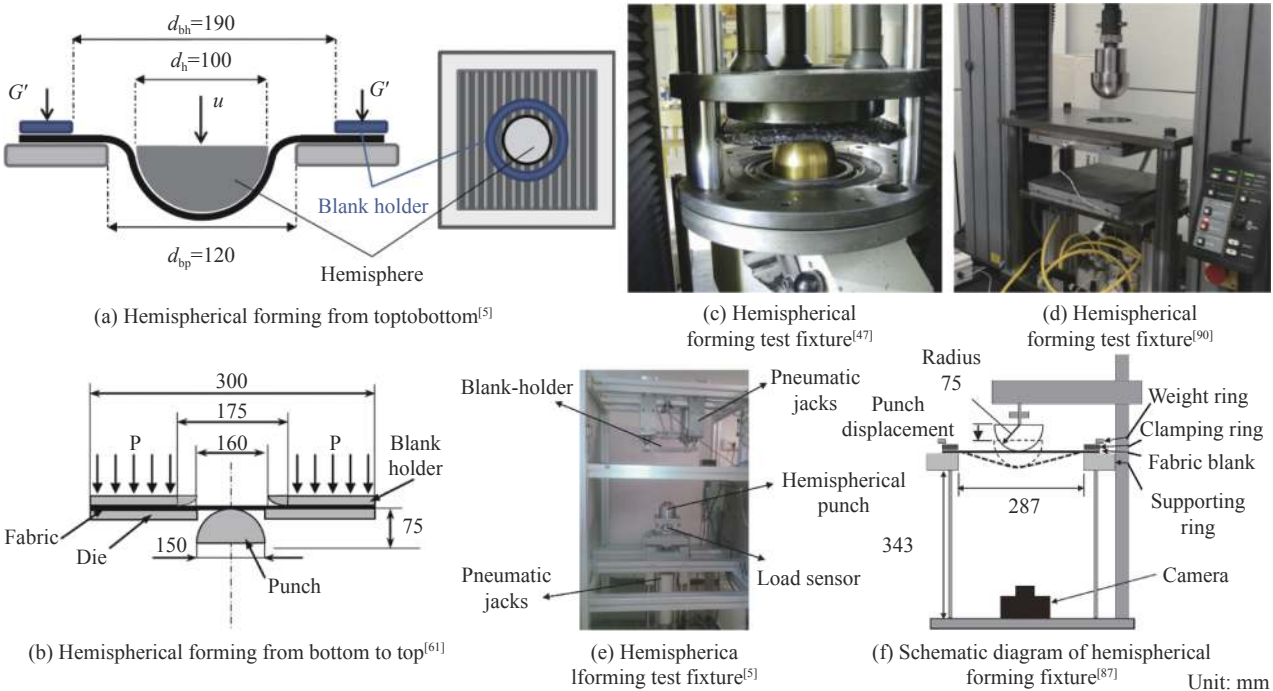
利用万能试验机结合设计的半球夹具(图11(c)和图11(d))可以快速、简单的开展半球成型试验。在不借助万能试验机的条件下，Xiao等^[5]和Arnold等^[87]设计了图11(e)和图11(f)所示的半球成型专用试验装置进行试验。无论使用上述哪种试验装置进行半球成型试验，测试过程中织物的压边装

表6 半球成型测试的试验参数

Table 6 Experimental parameters of hemispherical forming test

Material	Punch/Circular hole size/mm	Sample size/mm	Speed/(mm·min ⁻¹)	Strain measurement method	Blank-holder pressure	Ref.
3D warp interlock preforms	150/160	300×300	—	“tracers” yarns	0.2 MPa	[85]
Non-crimp carbon fabrics	150/287	Diameter 380	90	“shape-from-focus” (SFF)	9.4 kg	[87]
Bi-axial carbon fibre NCF	100/104	300×300	100	Grid strain analysis (GSA)	1 200 N	[90]
Stitched UD-NCF	100/120	350×350	100	Optical strain analysis	750 g	[61]
Twill 2/2 woven fabric	100/122	260×260	2 700	CCD camera	0.025, 0.075 MPa	[88]
3D warp interlock/2D plain weave fabrics	150/150	250×250	45	Digital camera	0.2 MPa	[13]
Plain-weave fabric	150/160	400×400	30	Optical strain analysis	0.05 MPa	[92]
Triaxial fabrics	150/160	300×300	45	Video camera	—	[5]

Note: CCD—Charge coupled device.



d_h —Hemisphere diameter; d_{bh} —Inner diameter of blank holder; d_{bp} —Hole diameter in the base plate; u —Hemispherical displacement; P —Blank-holder pressure; G —Gravity of blank-holder

图 11 半球成型试验

Fig. 11 Hemispherical forming test

置形状和压边载荷大小对织物起皱的大小和数量都具有重要影响^[88]。Rashidi 等^[89]研究了压边装置对预制体起皱程度及其他局部缺陷(如纤维滑移和纱线摩擦)的影响,通过修改压边装置的几何形状显著减小了预制体中的褶皱缺陷。Arnold 等^[87]根据如图 11(f)所示的试验装置研究了压边载荷大小对不同类型织物起皱性能的影响,结果发现同种压边载荷对不同类型织物的减皱效果差异较大,且载荷过大会增加试样变形的阻力、容易导致纱线断裂;载荷过小会导致试样松弛、产生褶皱。半球成型试验结果的精确表征是获取准确结论的重要保障。目前,测量半球成型过程中预制体变形特征(材料缩进、面内剪切和层间滑动)的方法主要有 2 种:(1)非接触式光学测量法^[87-88],将“示踪纱”织入预制体中或利用彩色记号笔在预制体表面做出点或网格标记,然后通过数码相机拍摄预制体的成型过程,最后手动或利用 DIC 系统提取图像中的变形特征;(2)接触式测量法^[90-91],以正方形网格标记预制体的表面,使用三坐标测量仪识别网格点的三维坐标,以此为基础获取网格点位移和网格线之间的夹角变化。非接触式测量方法简单快捷,但测量结果的精度取决于图像拍摄和特征提取技术的准确性;接触式测量方法精

度较高,但操作繁琐,后期仍需要计算机辅助计算。基于上述试验装置和变形表征方法,研究人员对 2D 缝合织物^[61]、3D 铺层织物^[88,92]、3D 机织物^[13]和 3D 编织物^[5]在成型过程中的变形起皱机制开展了大量研究。

综上所述,尽管半球成型试验装置较简单,但是如何根据预制体结构选择合适的试验参数和精准的变形表征方法仍然没有可以参考的依据。此外,不同试验参数得到的载荷-位移曲线之间不具有可比性,建立有效的归一化方法去除试样大小、冲头半径和压边夹持力等参数对试验结果的影响,增强半球成型试验结果之间的可比性是目前亟待解决的问题。

5.2 复杂结构成型试验

复杂外形的复合材料构件制备过程中预制体需要进行复杂的外形转变,以适应构件的几何尺寸需求。然而,复杂形状成型会导致预制体产生纱线滑移、屈曲和局部褶皱等缺陷的概率显著提高。因此,开展预制体复杂结构成型试验十分必要。相比于半球成型试验,复杂结构成型对预制体的适形能力提出了更高的要求。表 7 总结了一些文献中进行复杂结构成型试验所使用的参数。

表 7 复杂结构成型测试的试验参数
Table 7 Experimental parameters of special-shaped forming test

Material	Forming experiment	Sample size/mm	Speed/(mm·min ⁻¹)	Strain measurement method	Blank-holder pressure	Ref.
Glass/polypropylene plain weave fabric	Double dome benchmark	470×270	200	Manual image analysis	100 N	[63]
Plain woven composite fabric	Double dome benchmark	470×270	20	Manual image analysis	100 N	[93]
Glass-polypropylene (PP)	Double dome benchmark	452×640	100	Manual image analysis	No	[94]
G1151@ interlock fabric	Tetrahedral shape	—	—	Optical module	480 N	[95]
G1151@ interlock fabric	Prismatic shape	—	30	Digital Image Correlation (DIC)	9.22 N/yarn	[96]

双穹顶成型^[93]是常用的具有国际标准的表征织物预制体适形性能的试验方法。Khan 等^[63]研制了一种双穹顶成型试验装置如图 12(a)中的①所示,该装置采用 6 个分段组合而成的防皱压边装置对试样施加恒定 100 N 的夹持力,每个分段的宽度为 20 mm,厚度为 5 mm。试验前,通过在织物表面涂上一层与树脂混合的薄的商用固化剂,可以使织物在成型试验后维持新的形状(图 12(a)中的②和③),以便分析变形后试样的局部变形状

态。为了测试预浸料的适形性能, Harrison 等^[94]在前人的基础上对双穹顶试验进行了以下改进:(1)使用弹簧对预制体施加张力来减少起皱(图 12(e)中的①),而不是使用基于摩擦的防皱压边圈;(2)试验配备加热装置,可以在高温环境中进行,以保证成型时预浸料中的树脂基体处于流动状态,成型冷却后预制体将维持新的形状(图 12(e)中的②)。试验测量了成型后试样表面的剪切角,结果发现试验材料和边界条件的变化会导致整个试样

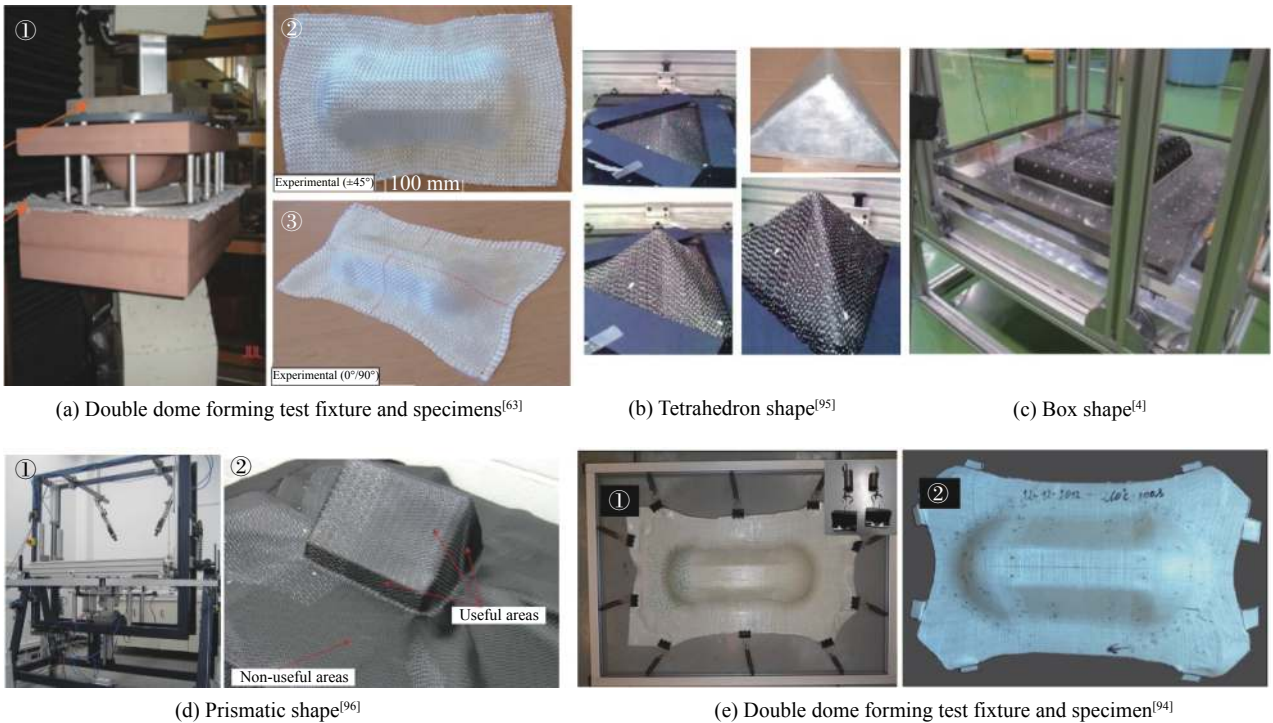


图 12 复杂结构成型试验

Fig. 12 Forming test of special-shaped structure

的剪切角分布明显不同。除了双穹顶成型，Allaoui 等^[95-96]开发了一种能够适应任意试验参数(冲头载荷、冲头速度和抗皱压边载荷等)和成型形状的试验装置如图 12(d) 中的①所示，该装置由冲头/模具组、预张紧系统和光学测量 3 个部分组成。为了研究单层和多层织物复杂成型过程中的变形起皱机制，采用该装置对四面体(图 12(b))和棱柱形(图 12(d) 中的②)结构开展了织物成型试验，利用光学测量技术对预制体成型后的纤维方向(或平面内剪切角)和起皱的形状进行了表征，使用标记跟踪软件 Deftac3D 或 DIC 系统计算了试样的三维位移场和应变场。试验结果表明冲头几何形状、预制体与冲头相对的初始位置和预制体工艺参数等都是影响成型起皱形状和数量的关键因素。织物对不同曲率外形的适形性能差异较大，Iwata 等^[4]对具有 4 种不同角半径(10、20、30 和 40 mm)的方盒型模具开展了织物成型试验。成型后的试样被夹持在试验装置上如图 12(c) 所示，通过分析试样表面标记点的位移可以获取试样局部的变形信息。试验结果发现，位于方盒角部的纱线会发生弯曲和滑移，且大曲率(小角半径)会加剧纱线位置的变异。

复杂结构的成型试验研究相对较少。已报道

的文献中缺乏对试验参数进行系统的研究，导致各参数对预制体成型性能的独立或耦合作用机制尚不清晰。此外，不同文献中报道的试验参数各不相同，如何简化试验装置和优化试验参数以减小外部因素对预制体适形性能的影响值得深入研究。预制体成型性能的研究是冲压成型工艺优化和复合材料结构设计的重要前提，对提高最终复合材料力学性能的稳定性和可靠性具有重要指导作用。

6 总结与展望

作为复合材料的增强体，纺织预制体的纤维结构对最终复合材料的力学性能有着决定性影响。预制体在拉伸、压缩、弯曲、剪切和复杂成型过程中会发生宏观变形，这些宏观变形由内部纱线的伸直、挤压和错位等微细观变形构成，且不同变形模式之间存在明显的耦合作用。通过试验来研究预制体的力学行为和变形特性是最直接，最有效的方法。近年来，国内外研究人员对预制体在不同变形模式下的测试方法开展了大量研究并取得了实质性的进展。根据当前国内外的研究现状，对纤维预制体力学性能和变形特性的测试和表征方法进行了如下总结与展望：

(1) 预制体的拉伸试验主要包括单轴拉伸和双

轴拉伸。已有的拉伸试验研究中主要针对的是2D织物,对于2.5D角联锁机织、3D正交机织和3D编织等高厚度预制体的拉伸变形测试方法有待进一步研究。高厚度预制体拉伸变形测试的难点在于无法实现试样的有效夹持,由于拉伸载荷远大于夹具与预制体之间的摩擦力,直接夹持会导致试样发生滑脱。尽管可以对试验夹持端进行树脂固化,但无法保证固化后试样内纱线的平行和张力的均匀一致。对于双轴拉伸测试,在2D预制体基础上开发出适合3D高厚度试样的测试方法是未来研究的重点;

(2) 预制体的压缩试验主要分为恒压法和等速法。采用两种方法均可以研究压缩过程中预制体纤维体积分量的变化规律、压缩松弛特性及纤维结构的变化机制。基于目前的压缩试验方法还无法实时获取压缩过程中预制体内部纤维结构的变化,采用Micro-CT原位表征技术来研究预制体的压缩变形过程是未来发展的方向;

(3) 预制体的弯曲试验主要包括悬臂梁法、三点弯法和Kawabata弯曲法。悬臂梁法计算的抗弯刚度误差较大且难以用于测量刚度较大或高厚度的预制体;三点弯法简单、易操作,可适用于高厚度预制体的弯曲变形测试,但该方法不能获得均匀一致的曲率,也不适用在高温环境中进行较大挠度的弯曲;Kawabata弯曲法可以实现预制体的纯弯曲变形,保证样件变形后的曲率均匀分布,但该方法由于试验机的限制,只能对较小较薄的试样进行研究。表征不同弯曲挠度下预制体内部的纤维结构,确定不同纱线系统的变形机制是一个重要的研究方向;

(4) 预制体的剪切试验主要包括相框剪切、偏轴拉伸和层间剪切。相框剪切试验常见的问题主要有:①预制体夹持误差(纱线未伸直、过松或过紧)容易导致夹持区域产生褶皱;②不同的夹持方法(螺栓紧固或钉板固定)会造成测试结果的较大差异;③试验装置限制了其在高温环境中进行测试;④缺少对不平衡织物试验结果进行归一化的方法。为了提高相框剪切试验结果的可靠性,必须在试验前仔细的制备和安装试样。偏轴拉伸试验由于简单、易实现,因而可以在高温环境中进行预浸料的面内剪切试验。其缺点在于随着剪切变形的增大,试样受到拉伸-剪切耦合作用会发生不均匀的剪切变形。预制体层间剪切试验的研

究相对较少,随着高厚度3D预制体的广泛应用,预制体的层间剪切性能和变形机制需要深入研究。预制体的剪切变形往往存在耦合效应,如拉伸/面内剪切耦合和压缩/层间剪切耦合等,测试过程很难考虑耦合效应,定义有效的归一化方法减小或消除拉伸/压缩对剪切试验结果的影响有待进一步研究;

(5) 预制体的成型试验主要包括半球成型和复杂结构成型。半球成型试验简单,应用较广泛。复杂结构的成型试验装置较复杂,可成型的形状繁多。预制体成型试验未来还需要在以下几个方面进行深入研究:①简化试验装置和优化试验参数以减小外部因素对预制体成型测试结果的影响;②统一成型试验参数,开发归一化试验数据的方法;③表征成型后3D预制体内部纤维结构,研究局部纤维变形机制。

参考文献:

[1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
SHANYI D. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12(in Chinese).
[2] JIAO W, CHEN L, XIE J, et al. Effect of weaving structures on the geometry variations and mechanical properties of 3D LTL woven composites[J]. Composite Structures, 2020, 252: 112756.
[3] 邢丽英, 包建文, 礼嵩明, 等. 先进树脂基复合材料发展现状和面临的挑战[J]. 复合材料学报, 2016, 33(7): 1327-1338.
XING L Y, BAO J W, LI S M, et al. Development status and facing challenge of advanced polymer matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(7): 1327-1338(in Chinese).
[4] IWATA A, INOUE T, NAOUAR N, et al. Coupled meso-macro simulation of woven fabric local deformation during draping[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 118: 267-280.
[5] XIAO S, WANG P, SOULAT D, et al. An exploration of the deformability behaviours dominated by braiding angle during the forming of the triaxial carbon fibre braids[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 133: 105890.
[6] 中国纺织总会标准化研究所. 纺织材料和纺织制品压缩性能第1部分: 耐久压缩特性的测定: FZ/T 01051.1—1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
Standardization Research Institute of China Textile General Association. Textile materials and textile products-Compression properties-Part 1: Determination of lasting com-

- pression characteristics: FZ/T 01051.1—1998[S]. Beijing: China Standards Press, 1998(in Chinese).
- [7] 国家质量技术监督局. 纺织品织物弯曲长度的测定: GB/T 18318—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001. The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Textile fabrics-Determination of bending length: GB/T 18318—2001[S]. Beijing: China Standards Press, 2001(in Chinese).
- [8] 中国国家标准化管理委员会. 纺织品织物拉伸性能第1部分: 断裂强力 and 断裂伸长率的测定(条样法): GB/T 3923.1—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013. Standardization Administration of the People's Republic of China. Textiles-Tensile properties of fabrics-Part 1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method: GB/T 3923.1—2013[S]. Beijing: China Standards Press, 2013(in Chinese).
- [9] NAOUAR N, VIDAL-SALLÉ E, SCHNEIDER J, et al. Meso-scale FE analyses of textile composite reinforcement deformation based on X-ray computed tomography[J]. *Composite Structures*, 2014, 116: 165-176.
- [10] 黄小双, 姚远, 彭雄奇, 等. 考虑双拉耦合的复合材料编织物各向异性超弹性本构模型[J]. 复合材料学报, 2016, 33(10): 2319-2324. HUANG X S, YAO Y, PENG X Q, et al. Anisotropic hyperelastic constitutive model with biaxial tension coupling for woven fabric composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(10): 2319-2324(in Chinese).
- [11] ASTM. Standard test method for breaking force and elongation of textile fabrics (strip method): ASTM D5035[S]. West Conshohocken: ASTM, 2019.
- [12] ISO. Rubber-or plastics-coated fabrics—Determination of tensile strength and elongation at break: ISO 1421[S]. Geneva: ISO, 1998.
- [13] ABTEW M A, BOUSSU F, BRUNIAUX P, et al. Influences of fabric density on mechanical and moulding behaviours of 3D warp interlock para-aramid fabrics for soft body armour application[J]. *Composite Structures*, 2018, 204: 402-418.
- [14] CHEN J, CHEN W, WANG M, et al. Mechanical behaviors and elastic parameters of laminated fabric URETEK3216LV subjected to uniaxial and biaxial loading[J]. *Applied Composite Materials*, 2017, 24(5): 1107-1136.
- [15] GAO C, CHEN W, SHI T, et al. Response surface characterization for biaxial tensile properties of envelope fabrics under multiple stress ratios[J]. *Composite Structures*, 2019, 230: 111482.
- [16] BRIDGENS B, GOSLING P, JOU G T, et al. Inter-laboratory comparison of biaxial tests for architectural textiles[J]. *Journal of the Textile Institute*, 2012, 103(7): 706-718.
- [17] SHI T, CHEN W, GAO C, et al. Biaxial constitutive relationship and strength criterion of composite fabric for airship structures[J]. *Composite Structures*, 2019, 214: 379-389.
- [18] CARVELLI V, PAZMINO J, LOMOV S V, et al. Deformability of a non-crimp 3D orthogonal weave E-glass composite reinforcement[J]. *Composites Science and Technology*, 2012, 73: 9-18.
- [19] MENG J, LV M, QU Z, et al. Mechanical properties and strength criteria of fabric membrane for the stratospheric airship envelope[J]. *Applied Composite Materials*, 2016, 24(1): 77-95.
- [20] MIHAILOVIC T V, ASANOVIC K A, CEROVIC D D. Structural design of face fabrics and the core as a premise for compression behavior of 3D woven sandwich fabric[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2016, 20(6): 718-734.
- [21] VERNET N, TROCHU F. Analysis and modeling of 3D Interlock fabric compaction behavior[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 80: 182-193.
- [22] YOUSAF Z, POTLURI P, WITHERS P J, et al. Digital element simulation of aligned tows during compaction validated by computed tomography (CT)[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2018, 154: 78-87.
- [23] NGUYEN Q T, VIDAL-SALLÉ E, BOISSE P, et al. Mesoscopic scale analyses of textile composite reinforcement compaction[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 44(1): 231-241.
- [24] WEI K, LIANG D, MEI M, et al. A viscoelastic model of compression and relaxation behaviors in preforming process for carbon fiber fabrics with binder[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 158: 1-9.
- [25] MAHADIK Y, HALLETT S R. Effect of fabric compaction and yarn waviness on 3D woven composite compressive properties[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, 42(11): 1592-1600.
- [26] MAHADIK Y, BROWN K A R, HALLETT S R. Characterisation of 3D woven composite internal architecture and effect of compaction[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, 41(7): 872-880.
- [27] 蒋建军, 陈星, 邓国力, 等. 嵌套效应对单向织物压缩行为的影响[J]. 复合材料学报, 2017, 34(11): 2463-2472. JIANG J J, CHEN X, DENG G L, et al. Effect of nesting on the compaction behavior of unidirectional fabrics[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(11): 2463-2472(in Chinese).
- [28] GREEN S D, LONG A C, EL SAID B S F, et al. Numerical modelling of 3D woven preform deformations[J]. *Composite Structures*, 2014, 108: 747-756.
- [29] DAELEMANS L, TOMME B, CAGLAR B, et al. Kinematic and mechanical response of dry woven fabrics in through-thickness compression: Virtual fiber modeling with mesh overlay technique and experimental validation[J]. *Com-*

- posites Science and Technology, 2021, 207: 108706.
- [30] HOU X, HU H, SILBERSCHMIDT V V. A study of computational mechanics of 3D spacer fabric: Factors affecting its compression deformation[J]. *Journal of Materials Science*, 2012, 47(9): 3989-3999.
- [31] THOMPSON A J, EL SAID B, IVANOV D, et al. High fidelity modelling of the compression behaviour of 2D woven fabrics[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2018, 154: 104-113.
- [32] VALKOVA M, ANTHONY D B, KUCERNAK A R J, et al. Predicting the compaction of hybrid multilayer woven composite reinforcement stacks[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 133: 105851.
- [33] SYERKO E, COMAS-CARDONA S, BINETRUY C. Models of mechanical properties/behavior of dry fibrous materials at various scales in bending and tension: A review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(8): 1365-1388.
- [34] BOISSE P, COLMARS J, HAMILA N, et al. Bending and wrinkling of composite fiber preforms and prepregs. A review and new developments in the draping simulations[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 141: 234-249.
- [35] SÜLE G. Investigation of bending and drape properties of woven fabrics and the effects of fabric constructional parameters and warp tension on these properties[J]. *Textile Research Journal*, 2012, 82(8): 810-819.
- [36] GATOULLAT S, BAREGGI A, VIDAL-SALLÉ E, et al. Meso modelling for composite preform shaping-Simulation of the loss of cohesion of the woven fibre network[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 54: 135-144.
- [37] BILISIK K. Bending behavior of multilayered and multidirectional stitched aramid woven fabric structures[J]. *Textile Research Journal*, 2011, 81(17): 1748-1761.
- [38] YU F, CHEN S, VIISAINEN J V, et al. A macroscale finite element approach for simulating the bending behaviour of biaxial fabrics[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 191: 108078.
- [39] LAMMENS N, KERSEMANS M, LUYCKX G, et al. Improved accuracy in the determination of flexural rigidity of textile fabrics by the Peirce cantilever test (ASTM D1388)[J]. *Textile Research Journal*, 2014, 84(12): 1307-1314.
- [40] DE BILBAO E, SOULAT D, HIVET G, et al. Experimental study of bending behaviour of reinforcements[J]. *Experimental Mechanics*, 2010, 50(3): 333-351.
- [41] LIANG B, CHAUDET P, BOISSE P. Curvature determination in the bending test of continuous fibre reinforcements[J]. *Strain*, 2017, 53(1): 12213.
- [42] LIANG B, HAMILA N, PEILLON M, et al. Analysis of thermoplastic prepreg bending stiffness during manufacturing and of its influence on wrinkling simulations[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, 67: 111-122.
- [43] SHERWOOD J A, FETFATSIDIS K A, GORCZYCA J L, et al. Fabric thermostamping in polymer matrix composites[M]//*Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*. Sawston: Woodhead Publishing, 2012: 139-181.
- [44] ALSHAHRANI H, HOJJATI M. A new test method for the characterization of the bending behavior of textile prepregs[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 97: 128-140.
- [45] ALSHAHRANI H, HOJJATI M. Bending behavior of multilayered textile composite prepregs: Experiment and finite element modeling[J]. *Materials & Design*, 2017, 124: 211-224.
- [46] LIANG B, COLMARS J, BOISSE P. A shell formulation for fibrous reinforcement forming simulations[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 100: 81-96.
- [47] DANGORA L M, MITCHELL C, WHITE K D, et al. Characterization of temperature-dependent tensile and flexural rigidities of a cross-ply thermoplastic lamina with implementation into a forming model[J]. *International Journal of Material Forming*, 2016, 11(1): 43-52.
- [48] MARGOSSIAN A, BEL S, HINTERHOELZL R. Bending characterisation of a molten unidirectional carbon fibre reinforced thermoplastic composite using a dynamic mechanical analysis system[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 77: 154-163.
- [49] CHARMETANT A, ORLIAC J G, VIDAL-SALLÉ E, et al. Hyperelastic model for large deformation analyses of 3D interlock composite preforms[J]. *Composites Science and Technology*, 2012, 72(12): 1352-1360.
- [50] ROPERS S, KARDOS M, OSSWALD T A. A thermo-viscoelastic approach for the characterization and modeling of the bending behavior of thermoplastic composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 90: 22-32.
- [51] SACHS U, AKKERMAN R. Viscoelastic bending model for continuous fiber-reinforced thermoplastic composites in melt[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 100: 333-341.
- [52] POPPE C, ROSENKRANZ T, DÖRR D, et al. Comparative experimental and numerical analysis of bending behaviour of dry and low viscous infiltrated woven fabrics[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 124: 105466.
- [53] BOISSE P, BAI R, COLMARS J, et al. The need to use generalized continuum mechanics to model 3D textile composite forming[J]. *Applied Composite Materials*, 2018, 25(4): 761-771.

- [54] CALISKAN U, APALAK M K. Low velocity bending impact behavior of foam core sandwich beams: Experimental[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 112: 158-175.
- [55] ARIDHI A, ARFAOUI M, MABROUKI T, et al. Textile composite structural analysis taking into account the forming process[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 166: 773-784.
- [56] MOEZZI M, YEKRANG J, KHODADAD A, et al. Characterizing the wrinkling behavior of woven engineering fabrics with local non-uniformity[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 118: 20-29.
- [57] MONTAZERIAN H, RASHIDI A, HOORFAR M, et al. A frameless picture frame test with embedded sensor: Mitigation of imperfections in shear characterization of woven fabrics[J]. *Composite Structures*, 2019, 211: 112-124.
- [58] ZHANG Y, SUN F, WANG Y, et al. Study on intra/inter-ply shear deformation of three dimensional woven preforms for composite materials[J]. *Materials & Design*, 2013, 49: 151-159.
- [59] BOISSE P, HAMILA N, VIDAL-SALLÉ E, et al. Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses[J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 71(5): 683-692.
- [60] HOSSEINI A, KASHANI M H, SASSANI F, et al. Identifying the distinct shear wrinkling behavior of woven composite preforms under bias extension and picture frame tests[J]. *Composite Structures*, 2018, 185: 764-773.
- [61] SCHIRMAIER F J, WEIDENMANN K A, KÄRGER L, et al. Characterisation of the draping behaviour of unidirectional non-crimp fabrics (UD-NCF)[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 80: 28-38.
- [62] MITCHELL C, DANGORA L, BIELMEIER C, et al. Investigation into the changes in bending stiffness of a textile reinforced composite due to in-plane fabric shear: Part 1-Experiment[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 85: 94-102.
- [63] KHAN M A, MABROUKI T, VIDAL-SALLÉ E, et al. Numerical and experimental analyses of woven composite reinforcement forming using a hypoelastic behaviour. Application to the double dome benchmark[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(2): 378-388.
- [64] DUHOVIC M, MITSCHANG P, BHATTACHARYYA D. Modelling approach for the prediction of stitch influence during woven fabric draping[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, 42(8): 968-978.
- [65] LI L, ZHAO Y, VUONG H G N, et al. In-plane shear investigation of biaxial carbon non-crimp fabrics with experimental tests and finite element modeling[J]. *Materials & Design*, 2014, 63: 757-765.
- [66] 罗锡林, 谭惠丰, 武国军, 等. 国产F₁₂芳纶织物面内剪切性能
- 的实验[J]. *复合材料学报*, 2015, 35(3): 591-598.
- LUO X L, TAN H F, WU G J, et al. Experimental investigation of in-plane shear performance for F-12 aramid fabric[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 35(3): 591-598(in Chinese).
- [67] ZHU D, MOBASHER B, VAIDYA A, et al. Mechanical behaviors of Kevlar 49 fabric subjected to uniaxial, biaxial tension and in-plane large shear deformation[J]. *Composites Science and Technology*, 2013, 74: 121-130.
- [68] CAO J, AKKERMAN R, BOISSE P, et al. Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008, 39(6): 1037-1053.
- [69] 关留祥, 李嘉禄, 焦亚男, 等. 航空发动机复合材料叶片用3D机织预制体研究进展[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(4): 748-759.
- GUAN L X, LI J L, JIAO Y N, et al. Review of 3D woven preforms for the composite blades of aero engine[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(4): 748-759(in Chinese).
- [70] MOEZZI M, GHANE M, NICOLETTO G, et al. Analysis of the mechanical response of a woven polymeric fabric with locally induced damage[J]. *Materials & Design*, 2014, 54: 279-290.
- [71] ALSAYEDNOOR J, LENNARD F, YU W R, et al. Influence of specimen pre-shear and wrinkling on the accuracy of uniaxial bias extension test results[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 101: 81-97.
- [72] 关留祥, 李嘉禄, 焦亚男, 等. 不平衡2.5D碳纤维机织预制体偏轴拉伸性能[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(2): 293-301.
- GUAN L X, LI J L, JIAO Y N, et al. Research progress in nondestructive testing technologies for textile composite preform forming process[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(2): 293-301(in Chinese).
- [73] HARRISON P, ABDIWI F, GUO Z, et al. Characterising the shear-tension coupling and wrinkling behaviour of woven engineering fabrics[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(6): 903-914.
- [74] RASHIDI A, MILANI A S. A multi-step biaxial bias extension test for wrinkling/de-wrinkling characterization of woven fabrics: Towards optimum forming design guidelines[J]. *Materials & Design*, 2018, 146: 273-285.
- [75] BOISSE P, HAMILA N, GUZMAN-MALDONADO E, et al. The bias-extension test for the analysis of in-plane shear properties of textile composite reinforcements and prepreps: A review[J]. *International Journal of Material Forming*, 2016, 10(4): 473-492.
- [76] HARRISON P, ALVAREZ M F, ANDERSON D. Towards comprehensive characterisation and modelling of the forming and wrinkling mechanics of engineering fabrics[J]. *International Journal of Solids and Structures*,

- 2018, 154: 2-18.
- [77] HARRISON P, TAYLOR E, ALSAYEDNOOR J. Improving the accuracy of the uniaxial bias extension test on engineering fabrics using a simple wrinkle mitigation technique[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 108: 53-61.
- [78] ZHAO X, LIU G, GONG M, et al. Effect of tackification on in-plane shear behaviours of biaxial woven fabrics in bias extension test: Experiments and finite element modeling[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 159: 33-41.
- [79] POPPE C, DÖRR D, HENNING F, et al. Experimental and numerical investigation of the shear behaviour of infiltrated woven fabrics[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 114: 327-337.
- [80] MACHADO M, MURENU L, FISCHLSCHWEIGER M, et al. Analysis of the thermomechanical shear behaviour of woven-reinforced thermoplastic-matrix composites during forming[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 86: 39-48.
- [81] 胡虹玲, 龚友坤, 彭雄奇, 等. 考虑拉剪耦合的二维编织物各向异性超弹性本构模型[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(6): 1388-1393.
- HU H L, GONG Y K, PENG X Q, et al. An anisotropic hyperelastic constitutive model considering shear-tension coupling for 2-dementional woven fabrics[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(6): 1388-1393(in Chinese).
- [82] HARRISON P, HÄRTEL F. Corrigendum to 'Evaluation of normalisation methods for uniaxial bias extension tests on engineering fabrics' [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 80: 104-106.
- [83] MATHIEU S, HAMILA N, BOUILLON F, et al. Enhanced modeling of 3D composite preform deformations taking into account local fiber bending stiffness[J]. *Composites Science and Technology*, 2015, 117: 322-333.
- [84] TURK M A, VERMES B, THOMPSON A J, et al. Mitigating forming defects by local modification of dry preforms[J]. *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 2020, 128: 105643.
- [85] DUFOUR C, WANG P, BOUSSU F, et al. Experimental investigation about stamping behaviour of 3D warp interlock composite preforms[J]. *Applied Composite Materials*, 2013, 21(5): 725-738.
- [86] KHATKAR V, VIJAYALAKSHMI AG S, R N M, et al. Formability behaviour of 3D woven solid structures with varying stuffer binder ratio[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 18: 2753-2759.
- [87] ARNOLD S E, SUTCLIFFE M P F, ORAM W L A. Experimental measurement of wrinkle formation during draping of non-crimp fabric[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 82: 159-169.
- [88] LABANIEH A R, GARNIER C, OUAGNE P, et al. Intra-ply yarn sliding defect in hemisphere preforming of a woven preform[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 107: 432-446.
- [89] RASHIDI A, MILANI A S. Passive control of wrinkles in woven fabric preforms using a geometrical modification of blank holders[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 105: 300-309.
- [90] CHEN S, MCGREGOR O P L, HARPER L T, et al. Defect formation during preforming of a bi-axial non-crimp fabric with a pillar stitch pattern[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 91: 156-167.
- [91] BARDL G, NOCKE A, HUBNER M, et al. Analysis of the 3D draping behavior of carbon fiber non-crimp fabrics with eddy current technique[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 132: 49-60.
- [92] GUZMAN-MALDONADO E, WANG P, HAMILA N, et al. Experimental and numerical analysis of wrinkling during forming of multi-layered textile composites[J]. *Composite Structures*, 2019, 208: 213-223.
- [93] PENG X, REHMAN Z U. Textile composite double dome stamping simulation using a non-orthogonal constitutive model[J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 71(8): 1075-1081.
- [94] HARRISON P, GOMES R, CURADO-CORREIA N. Press forming a 0/90 cross-ply advanced thermoplastic composite using the double-dome benchmark geometry[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 54: 56-69.
- [95] ALLAOUI S, BOISSE P, CHATEL S, et al. Experimental and numerical analyses of textile reinforcement forming of a tetrahedral shape[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, 42(6): 612-622.
- [96] ALLAOUI S, CELLARD C, HIVET G. Effect of inter-ply sliding on the quality of multilayer interlock dry fabric preforms[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 68: 336-345.