

引文格式: 官威, 李文晓, 戴瑛, 等. 纺织复合材料预制体变形研究综述[J]. 航空制造技术, 2021, 64(1/2): 22-37.

GUAN Wei, LI Wenxiao, DAI Ying, et al. A review of study on deformation of textile composite preforms[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(1/2): 22-37.

纺织复合材料预制体变形研究 综述

官威, 李文晓, 戴瑛, 贺鹏飞

(同济大学航空航天与力学学院, 上海 200092)

[摘要] 以具有良好整体性能的织物作为增强体的纺织复合材料克服了传统复合材料层间剪切强度低、抗分层能力差、开裂敏感等缺点, 且具有优异的近净成形能力, 易于成型。这些优点使得这种复合材料被越来越广泛地应用于航空航天、船舶、汽车、医疗器械等领域。纺织预制体的可变形性对其渗透率及最终复合材料构件的力学性能有着重要的影响。简要介绍了二维和三维织物的结构特点; 阐述了织物的拉伸、横向压缩、面内剪切和弯曲变形机理; 基于数值模拟和试验方法, 综述了国内外预制体变形研究的进展; 最后, 展望了预制体变形数值模拟的发展方向。

关键词: 纺织预制体; 织物结构; 变形机理; 数值模拟; 试验方法

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.01/02.022



官威

工程师, 硕士, 研究方向为复合材料力学。

编织复合材料是复合材料与编织技术相结合的产物, 因其采用在空间结构上整体性更好的编织物作为增强体, 所以除了传统复合材料所具有的轻质、高强等特点, 这种复合材料还表现出了抗冲击性能好、损伤容限高等优异的力学性能。特别是立体纺织复合材料, 其增强体结构除了面内的经纱、纬纱外, 还有沿厚度方向贯穿“层”与“层”的接结纱(图1)。得益于这一结构特点, 这种立体编织复合材料克服了层合板复合材料层间性能差、易分层、开裂敏感等缺点。此外, 三维整体编织技术能按照最终复合材料构件的几何尺寸, 编织出异型、变厚度、变截面的仿形织物作为增强体, 这使得编织复合材料具有良好的近净成形能力, 同时还降低了手工铺层产生的劳动成本, 减少了二次加工量。基于上述各种优点, 编织复

合材料受到了越来越多的关注, 其在航空航天、船舶、汽车、体育用品、医疗器械等领域的应用也越来越广泛。尤其在航空发动机方面, 如 Leap-X 发动机的风扇采用通过三维编织树脂传递模塑工艺(3D-Woven-RTM, 3D WRTM)制造的编织复合材料成型叶片(图2)。沈尔明等^[1]对碳纤维、芳纶纤维、碳化硅纤维和玻璃纤维等连续纤维增强的复合材料在民用航空发动机上的应用进行了概述。

纺织复合材料的成型过程, 主要可以分为以下两个阶段: (1) 预制体的预成型, 包括铺覆与压实; (2) 通过合适的成型工艺使树脂完全浸润预制体并固化。

在第1阶段, 干态、平板状织物首先被铺覆在具有一定曲率表面的模具上(图3), 使之具有与最终复合材料构件一致的几何外形。通过铺

覆,织物从平板状变成具有异型曲面的三维状。为了适应这种变化,织物往往需要经历较大的面内剪切、弯曲和扭转变形,这些变形会使预制体的细观结构发生变化,如纱线在空间上的重新分布、纱线滑移、纱线取向和卷曲率的改变,以及局部纤维体积含量分布不均,在一些剪切变形较大的区域甚至会出现织物褶皱、纱线屈曲等缺陷。铺覆后的合模加压过程,主要是对预制体进行压实以控制复合材料构件的厚度、纤维体积含量等参数。压实同样会改变预制体的结构,但这些变化更多地表现为织物中间隙的闭合、纱线卷曲幅度和截面形式的改变,在曲率较大的区域也会出现织物的褶皱(图4^[2])。预制体的变形对其复合材料的力学性能有着不同程度的影响,如Lin等^[3]基于CT扫描技术与能量法研究了2.5D机织复

合材料的拉伸性能。结果表明,预制体的横向压缩会增加其复合材料经、纬向的拉伸刚度,而面内剪切变形则相反,且剪切变形的影响要远大于压缩变形。

在第2阶段,纺织复合材料成型工艺最佳的选择是树脂传递模塑(Resin Transfer Molding, RTM)工艺,其主要原理是施加一定的注射压力使树脂从注胶口进入闭合的模腔中,使树脂能顺利流动并彻底浸润预制体,同时将多余树脂从出胶口排出,最后在一定的温度场和压力场下使树脂固化。预制体的渗透率是影响树脂流动的重要因素之一,其与预制体的结构形式、纤维体积含量等有关^[4]。铺覆与压实过程中预制体的变形对其渗透率有着重要的影响^[5],刘昊鑫等^[6]对这方面的研究进行了综述。

预制体的细观结构直接决定了

其为增强体的最终复合材料构件的力学性能,对预制体的渗透率也有着重要的影响。因此,对RTM工艺成型过程中复合材料预制体的变形行为进行研究非常重要。本文将分别从织物的结构形式、变形机理、数值方法和试验研究4个方面对国内外在预制体变形方面的研究进行综述,以期为一领域的其他学者提供一定的参考。

织物的结构形式

预制体的变形问题,相较于金属材料而言,更像是一种结构问题,不同结构的织物所表现出的力学性能往往会有较大的差异。图5^[7]所示为平纹、斜纹、缎纹织物在像框剪切试验中的典型剪切力-剪切角曲线。可以看出,平纹织物的剪切刚度大于斜纹和缎纹,且随着剪切角的增加,

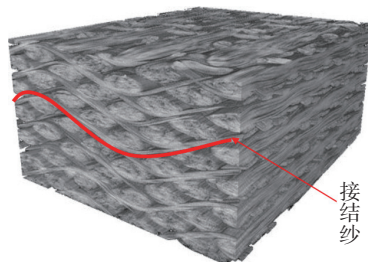


图1 大厚度立体织物

Fig.1 3D fabric with large thickness



图3 预制体的铺覆

Fig.3 Drapability of composite preform

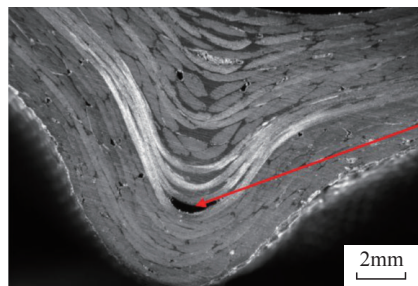


图4 压实所导致的织物褶皱

Fig.4 Wrinkling induced by compaction



图2 三维编织树脂传递模塑成型复合材料叶片

Fig.2 Fan blade by 3D WRTM

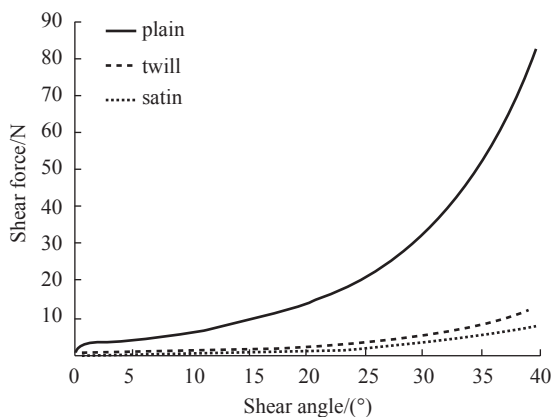


图5 平纹、斜纹、缎纹织物的典型剪切力-剪切角曲线

Fig.5 Typical shear force - shear angle curves for plain, twill and satin

其增长速率远大于另外两种。汪浩等^[8]对不同组织结构(平纹、斜纹、缎纹、无纬结构)的玄武岩织物曲面复合材料进行了试验研究,结果表明:平纹织物复合材料弯曲强度和模量最大,缎纹的挠度最大;缎纹织物复合材料的冲击性能最好;斜纹织物的复合材料顶破强力最高。Khokar等^[9]认为3D织物的力学性能取决于承载路径中纤维的数量和取向,而可靠性则取决于3D织物中纤维排列的紧密程度及分布的均匀性。因此,充分认识织物的结构特征有助于理解织物的变形机理及其所表现出的特殊的力学性能。

织物的织造过程决定了其结构形式具有多层次、多尺度的共性特征。如图6所示^[10],织物在宏观尺度表现为互相交织的各纱线系统的集合;细观尺度表现为单根纱线,对于具有周期性结构的织物,可用具有代表性的胞元(Representative Unit Cell, RUC)代替;微观尺度则可离散为直径在 μm 级的纤维单丝,如常用的碳纤、玻纤、芳纶纤维的直径分别为 $5\sim 7\mu\text{m}$ 、 $5\sim 25\mu\text{m}$ 、 $10\sim 20\mu\text{m}$ 。织物的这种多尺度特性决定了在研究其宏观力学行为时,必须充分考虑不同尺度层面的材料行为。

织物的结构形式按其织造方式可分为机织、编织、针织、非织造等,如图7所示^[11],也可按织物维度分为2D、3D织物,如图8所示^[12]。Dixit^[12]、刘洪玲^[13]等对机织、编织和针织结构的形式、特点做了介绍,其中,机织物在制造成本、织造效率及整体性能方面比编织和针织更具优势,是目前应用最广的织物结构形式。

图9所示为2D机织物中的平纹、斜纹和缎纹织物,可以看出,3种结构具有共同的特征:经、纬纱系统互相垂直。但是3种结构又各有特点:平纹织物的经纱、纬纱上下相互交织,其经、纬纱交织点和纱线的卷

曲是3者中最多的,织物的紧密程度也是最高的;斜纹织物的表面呈现出由连续的交织点构成的斜向纹路,相比于平纹织物,其交织点数量较少,紧密程度也较低;缎纹织物的表面也有斜向纹路,但这些纹路并不连续,其交织点是3者中最少的,紧密程度也最低。

3D机织物的主要结构形式为

正交(图10)和角连锁结构(图11)。正交机织物的经纱、纬纱、接结纱均呈伸直状态且相互垂直;角连锁机织物的纬纱呈伸直状态,经纱呈屈曲状态,经纱与纬纱互相垂直,并且经纱不仅在平面内沿纵向配置,还沿厚度方向以一定深度与角度同纬纱交织。单晶晶^[14]和杨彩云^[15]等对角连锁结构的分类、特点做了详

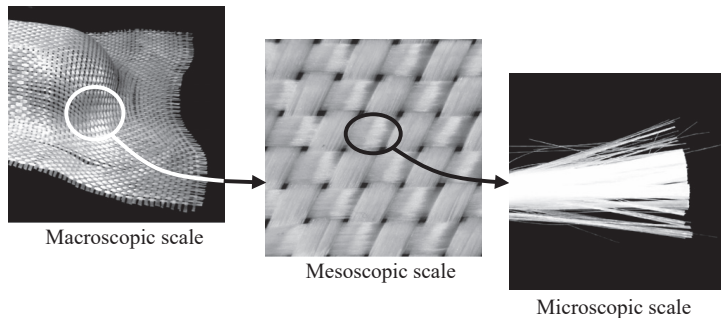


图6 织物的多尺度特性
Fig.6 Multiscale characteristics of fabrics

Classes		Subclasses	
Structured	woven	Plain weave/Twill weave/Satin weave/Triaxial weave/Interlock (3D)	
	Non-crimp/Stitched	UD/BD/Multi-axial	
	Braided	2D braided (regular/basket/in-laid)	
		3D braided (2-diagonal/3-diagonal/4-diagonal/round/spiral)	
Knitted	Bunting/Double knit/Four-way stretch knit/Interlock knit/Jersey/Milanese/Power net/Raised knit/Rachel knit/Rib knit/Single knit/Velour/Stretch velvet/Sweater knit/Sweatshirt knit/Tricot/Two-way stretch knit		
Non-woven	Mat (random chopped or continuous fibers)		
	Felt		

图7 织物结构分类
Fig.7 Classification of fabric structures

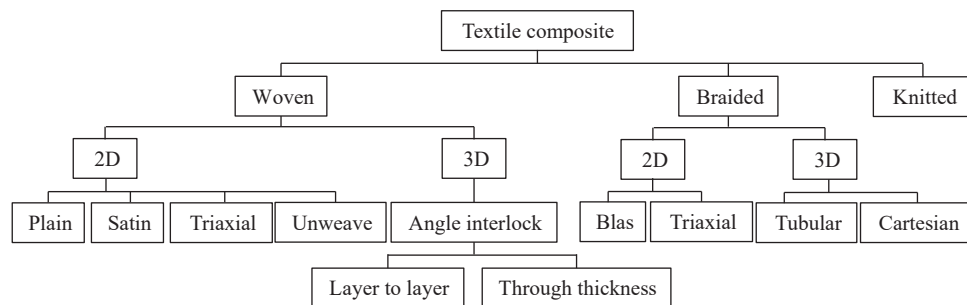
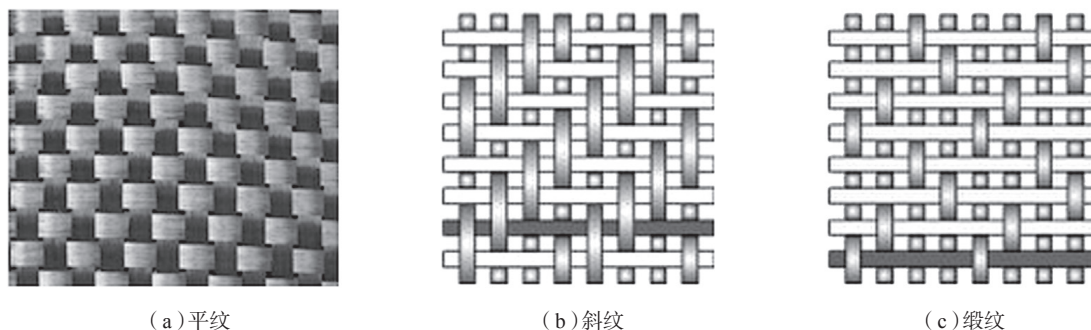


图8 纺织复合材料分类

Fig.8 Classification of textile composite



(a) 平纹

(b) 斜纹

(c) 缎纹

图9 2D机织物

Fig.9 2D woven textile

细的介绍。3D角连锁织物也被称为2.5D机织物,以其为增强体的2.5D机织复合材料已经实现了完全自动化和连续化生产,近年来被广泛应用^[15-17]。

织物的结构是影响其可成型性和力学性能的重要因素之一,也决定了其不同的应用场合。如在2D机织物中,缎纹织物纱线的直线段部分较多,具有最好的拉伸性能,因此比平纹更适用于拉伸较大的区域。但同时,缎纹织物纱线排列的紧密度最低,纱线容易滑动、错位,从而降低成型质量。平纹织物的紧密度最高,具有最好的抵抗纱线运动的能力,在成型过程中更易于掌控其纱线的运动规律。但是,过高的纱线排列紧密度也导致其铺覆性最差,最可能产生褶皱^[7]。斜纹织物的变形能力最好,能适应较大的剪切变形,因此其被常用于各种异型曲面构件的成型。

预制体的变形机理

1 拉伸变形

纱线的轴向拉伸刚度在量级上要远大于横向的其他刚度,纤维的取向对纤维增强复合材料的力学性能至关重要,在成型过程中必须对其严格控制。虽然单根纱线的拉伸行为基本是线性,但是对2D织物而言,整个织物的拉伸行为,不论是单轴拉伸(图12^[18])还是双轴拉伸(图13^[19]),在加载初期都呈现出非线性。这种非线性主要取决于织物中纱线的卷曲数量、卷曲幅度、纱线间的摩擦和挤压,还与微观尺度上纤维束内的接触摩擦有关^[19]。袁守忍^[20]对3种不同结构(深角联、浅交直联、浅交弯联)的2.5D机织预制体进行了经向和纬向拉伸试验,结果表明3种结构的预制体经向拉伸性能差异较大,其不仅与经、纬纱交织点

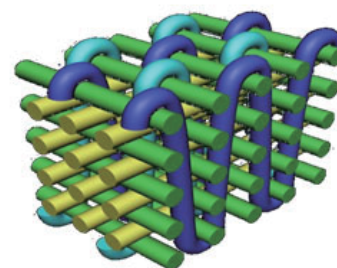


图10 三维整体正交织物

Fig.10 Through thickness 3D orthogonal fabric

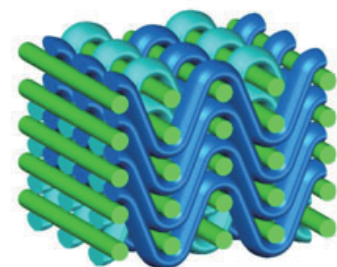


图11 三维层-层角连锁织物

Fig.11 Layer to layer 3D angle interlock fabric

数量有关,还与经纱取向角、经纱屈曲率和经纱贯穿的层数有关;因为纬纱基本呈直线分布,所以3者的纬向拉伸性能整体相同。张一帆^[21]通过试验发现三向正交织物的经、纬向的拉伸性能仅与各自方向的纱线有关,而与另外两组纱线的结构参数关系很小。主要是因为三向正交织物的经纱、纬纱和Z向纱在空间上互相垂直,在拉伸的过程中互不影响。除此之外,因为经、纬纱在整个拉伸过程中一直处于伸直状态,不存在纱线由屈曲状态向伸直状态转变的过程,所以从加载开始到载荷峰值,其应力-应变都为线性。

2 横向压缩变形

预制体在被铺覆到模具上后,还

会经历合模压实的阶段,其主要作用是使复合材料达到指定的厚度,控制复合材料的纤维体积含量。压实会改变预制体的微观、细观结构,影响预制体的渗透率、成型质量以及最终复合材料构件的力学性能。织物的横向压缩行为主要与织物的厚度、孔隙率、纱线间及纤维束内的滑移有关,一些研究^[22-25]认为织物厚度-压缩应力曲线(图14),可以分为3个阶段:低应力线性阶段、低应力非线性阶段和高应力线性阶段。每个阶段织物的主要变形都有所不同,如图15~17所示^[26]。低应力线性阶段主要为纱线滑移、经纬纱嵌套和纱线间隙减小,越来越多的内部纤维承受载荷;低应力非线性阶段主要为纤

维滑移、纤维间孔隙减小和经纬纱变形,织物厚度的减小变得困难;高应力线性阶段纤维滑移接近极限,随着压缩应力的增加,主要为纤维本身发生变形。万喜莉等^[25]对2.5D角连锁织物进行了压缩试验,以不同压应力下的织物制作了相应的复合材料,在对其进行磨抛处理后使用光学显微镜观察了经向、纬向截面,发现织物被横向压缩时纱线的主要变化为其屈曲程度和横截面的变化。谢永丰等^[22]还发现织物压缩卸载时的返回曲线具有滞后现象,认为这主要是由于压缩过程中摩擦力耗损造成的。

3 面内剪切变形

面内剪切变形是预制体在铺覆过程中的主要变形模式,宏观上主要表现为经、纬纱夹角的变化。大量试验结果已经表明,织物的面内剪切性能具有强烈的各向异性与高度非线性性的特点。目前,2D机织物的剪切变形机理已较为清楚^[19, 27-28]。以平纹织物为例,其典型的剪切力-剪切应变曲线如图18所示^[29],曲线大致可以分为3个阶段。在第1阶段,剪切力的量级及增长速率都非常小,织物的变形主要为经、纬纱绕交织点的刚性旋转,纱线本身的结构并没有变化,因此这一阶段剪切力的主要来源为纱线在交织点处的摩擦力;剪切角的增加会导致织物经、纬纱的交织面积增大,间隙减小;随着剪切角的继续增大,相邻的纱线开始互相接

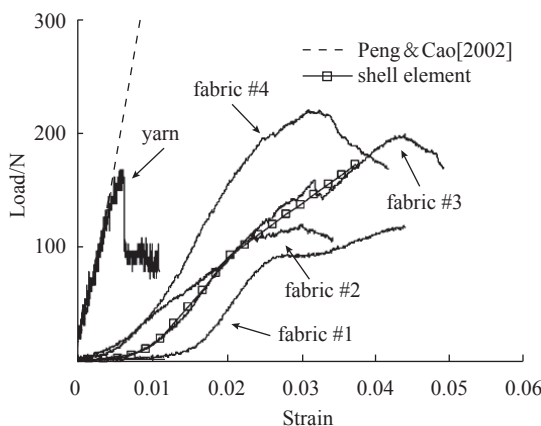


图12 单轴拉伸力-应变曲线
Fig.12 Uniaxial tension load-strain curves

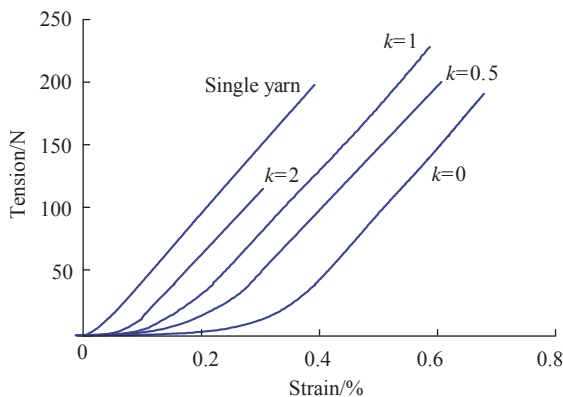


图13 不同k(经向应变/纬向应变)值拉伸载荷-应变曲线
Fig.13 Tension-strain curves for different k ($\epsilon_{warp}/\epsilon_{weft}$)

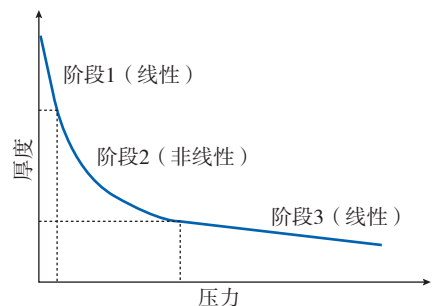


图14 织物压缩典型厚度-压力曲线
Fig.14 Typical thickness-transverse pressure curve

触,曲线进入第2阶段。在第2阶段,相邻的纱线会侧向挤压,剪切刚度明显增加,这一阶段剪切力的大小主要与纱线的横向压缩刚度有关;当所有相邻的纱线都完全接触,挤压达到极限时,剪切角达到所谓的“锁定角”时,便会出现面外的褶皱,如图19所示^[27],同时剪切力会急速增加,即曲线的第3阶段。因为3D织物的纱线系统除了在面内分布,还会沿厚度方向延伸,所以其剪切变形机理较2D织物更加复杂,目前鲜有文献述及。张一帆^[21]认为三向正交织物的剪切变形不仅是经、纬纱夹角的变化,还主要表现为Z向纱的挤压和扭转。关于织物的面内剪切性能,还需提及的一点就是纱线的拉伸状态对其有着重要的影响^[29-32],特别是在剪切变形的第一阶段。因为这一阶段剪切力的主要来源是经、纬纱的转动在交织点处产生的摩擦力,而纱线中的拉力会使得纱线由屈曲状态向伸直状态转变,进而增加摩擦力。

4 弯曲变形

在预制体的成型过程中,织物的弯曲行为与上面提到的拉伸、压缩和面内剪切行为相比显得不那么重要,在许多仿真模型中也常常会被忽略。然而,越来越多的研究^[7, 11-12, 33-42]表明,弯曲性能对于织物的成型模拟非常重要,尤其是在模拟褶皱成型时,其对于褶皱的尺寸、形状及数量都有重要影响。刘飞等^[43]研究了织物膜材弯曲刚度对其褶皱半波长、波幅的影响,结果表明:等厚度情况下,织物膜材弯曲刚度越低,褶皱幅值和褶皱半波长越小,但不影响褶皱区域分布。织物的弯曲问题,不同于金属等连续材料,是一个多尺度的结构问题,纱线的弯曲刚度也因为摩擦的存在不能被简单地视为其组分纤维弯曲刚度的叠加。织物的弯曲行为与其几何构型、组分纤维的力学性能、纤维束间束内的接触摩擦及纱线的相对运动均有关

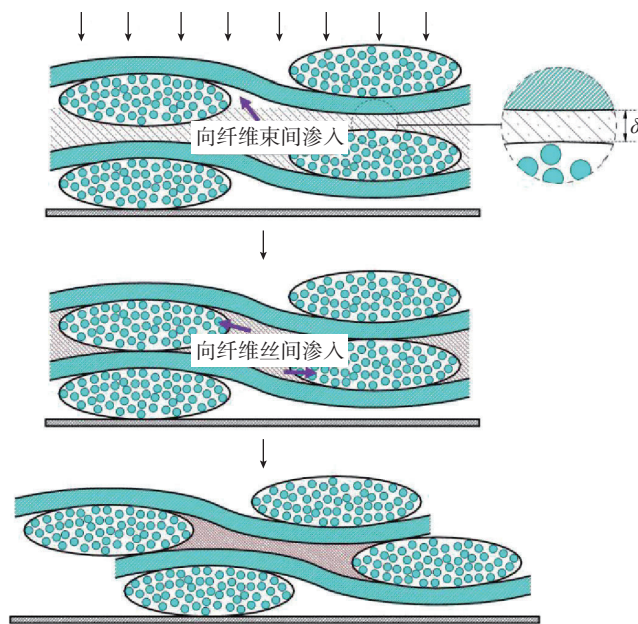


图15 低应力线性阶段
Fig.15 Low stress linear stage

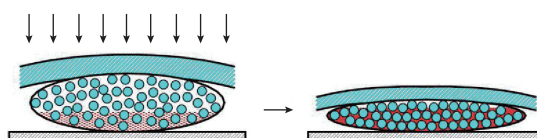


图16 低应力非线性阶段
Fig.16 Low stress nonlinear stage

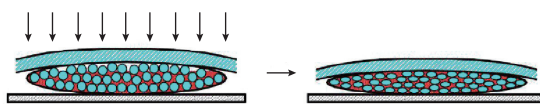


图17 高应力线性阶段
Fig.17 High stress linear stage

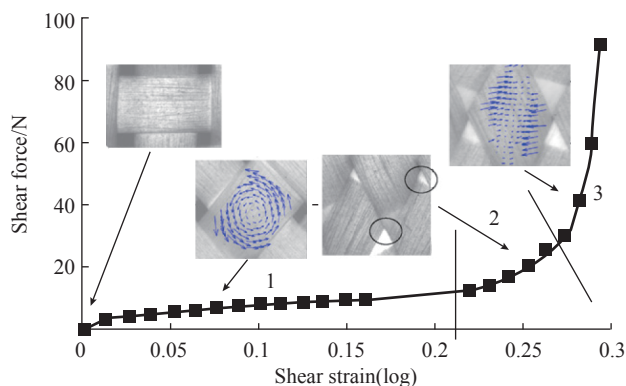


图18 平纹织物剪切典型力-应变曲线
Fig.18 Typical shear force-shear strain curve for plain

系^[7],变形机理更加复杂。图20所示为一种2.5D碳纤维织物的弯矩-曲率曲线,可以看出,织物的弯曲行为是非线性非弹性行为,且包含滞回现象。测量织物弯曲性能的标准试验装置有Peirce的悬臂梁弯曲装置和KES-FB2(Kawabata Evaluation System, KES)弯曲装置。然而,这两种试验方法都存在一定的不足:前者假设织物的弯曲变形为大挠度小应变,弯矩-曲率关系为线弹性,且只能测得弯曲刚度;后者最初是被设计用来测量较为柔软的服装纺织品的弯曲性能,不适合用于测量硬挺度更高、厚度更大的复合材料增强体。Bilbao等^[41]开发出了一种新型带有光学测量装置的挠度计如图21所示,该挠度计能够记录整个织物的变形历程,绘制弯矩-曲率曲线,可用于测量具有不同结构、不同厚度、不同弯曲刚度的各种机织物。

数值方法

通过数值方法模拟产品的生产过程,对产品的性能进行预测,以此来避免、减少生产中可能出现的问题和优化产品设计已成为各行各业不可或缺的一个环节。相比于试错法,数值模拟可以有效降低人工和时间成本,对于复合材料更是如此。正如前面提到的,预制体的铺覆、压实过程对后续的树脂渗透及最终复合材料的性能都有着重要的影响,必须精准地掌握铺覆、压实对预制体的结构、纤维取向、纤维体积含量等造成的变化。因此,合适的数值方法、模型对于复合材料的成型过程非常必要。按照不同的分析尺度,预制体成型过程数值方法可以分为连续、离散和半离散。

1 连续方法

连续的方法在宏观上把预制体视为一个连续体,而不用考虑预制体内部的细微观结构、纱线间的接触摩擦和相互挤压等。这种方法基于连

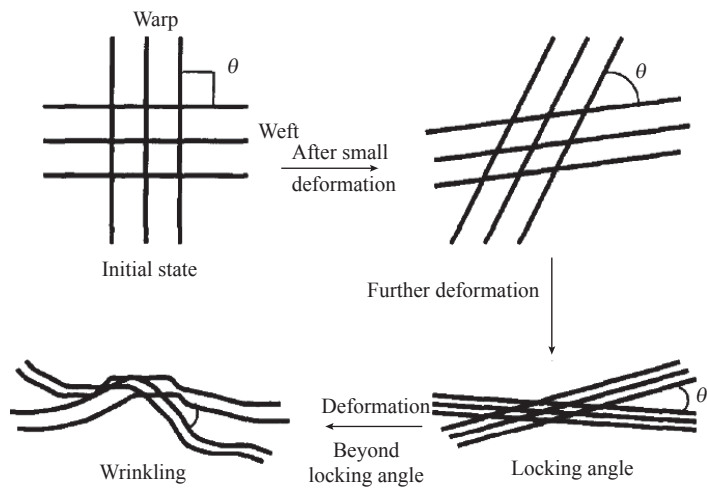


图19 2D织物的剪切变形与褶皱
Fig.19 Wrinkling and shear deformation of 2D fabric

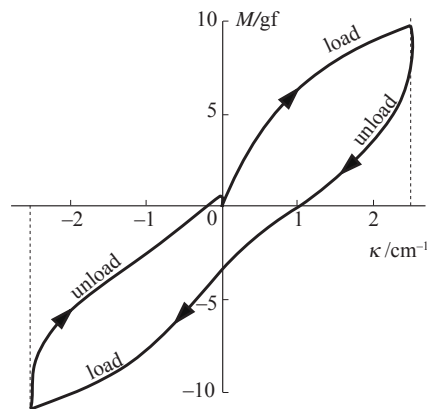


图20 2.5D碳纤维织物弯矩-曲率曲线
Fig.20 Bending moment-curvature for 2.5D carbon fabric

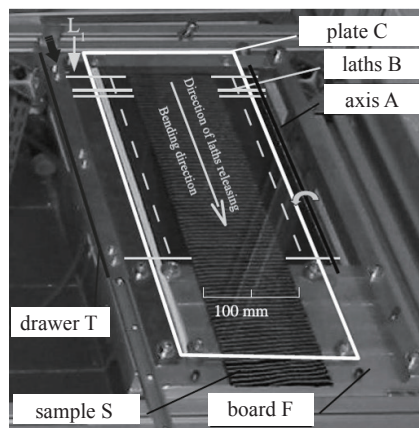


图21 新型挠度计的力学模块
Fig.21 Mechanical modules of new flexometer

续介质力学的相关理论,研究预制体作为一个整体对于载荷的响应情况,得到宏观上的载荷-变形曲线。此类方法的关键是需要选取一种合适的能反映织物特殊力学性能的本构模型,且需通过对相应的试验(单/双轴拉伸、偏轴拉伸、像框剪切等)曲线进行拟合,以得到模型中的关键力学性能参数。

Peng 等^[18]提出了一种针对 2D 机织物在大面内剪切变形下的非正交本构模型。模型对织物的变形做了如下 3 点假设:(1)解耦了织物的拉伸和面内剪切行为以及经、纬向的拉伸行为;(2)由织物的剪切所导致的纱线间隙的闭合不会影响纱线的拉伸行为,且剪切角没有达到锁定角;(3)忽略纱线的滑移。建立了沿经纱、纬纱方向的拖带坐标系,能够通过变形梯度追踪纱线在变形过程中的取向变化。该模型被用来模拟复合材料用机织物的半球冲压成型^[44]及机织复合材料的双球冲压成型^[45-46]。Yu 等^[47]也提出了类似的本构模型,并在后来研究中通过修改其中的剪切刚度项改进了该方法,以用于模拟 NCF 在剪切变形中的反对称剪切行为^[48]。Lee^[49]和张必超^[50]等分别通过考虑织物的拉剪耦合、双拉耦合效应,对 Peng 等的模型^[18]进行了改进。

Iwata 等^[51]提出了一种考虑织物局部变形(如纱线屈曲、扭曲、滑移)的耦合细观与宏观模拟的方法(Macro-Meso Zoom, MMZ)。该方法分别使用宏观尺度和细观尺度模型来模拟织物和纱线的力学行为。使用基于 Nishii 等^[52]提出的膜-壳单元(图 22)相结合的宏观方法来模拟织物的非线性本构行为,解耦了织物的面内与面外行为^[34],其中用膜单元考虑织物面内的拉伸、剪切行为,并假设拉、剪不耦合,用壳单元考虑织物面外的弯曲性能;使用 Charmentant 等^[10]提出的超弹本构模

型对纱线的力学行为进行细观分析。

Thompson 等^[2]基于织物压实的厚度-压力曲线确定层与层之间的接触关系,并将其引入膜-壳单元模拟方法中,使得这种方法能够体现织物在厚度方向的高度可压缩性,以及具有模拟因压实而产生的褶皱的能力。Xiong 等^[53]基于 DKT(Discrete Kirchhoff Theory)方法提出了一种棱柱形实体-壳单元(图 23),用于模拟织物厚度方向的行为对成型非常重要的情况,如板料成型,特别是成型过程中的压实。单元一共 6 个节点,除了 18 个平移自由度外,在单元中心垂直于中面方向额外添加了 1 个自由度,来改进单元厚度方向的力学行为。这种方法还使得验证成型过程中壳单元顶部和底部表面的载荷边界条件成为可能。

Yu 等^[33]基于 Chen 等^[54]提出的非正交本构模型与 ABAQUS/Explicit 复合材料层合板模块

(Composite Layup Toolset)中的层合壳单元,提出了一种模拟织物褶皱现象的新方法。该方法考虑了织物的面外弯曲刚度,使用三层壳单元(图 24)来模拟整个厚度的织物,并将织物面外的弯曲刚度与面内的拉伸和剪切刚度进行分离,减少了自由度的数量,提高了求解效率,最后通过对比双轴 NCF 偏轴拉伸的试验与模拟结果,验证了该方法的有效性。

超弹性本构模型经常被用来模拟织物宏观上的力学行为。织物总的应变能等于与织物独立变形模式相对应的应变能之和,选取合适的不变量,将应变能表示成这些不变量的多项式函数。通过相应的试验(经向拉伸、纬向拉伸和像框剪切等)及对试验数据进行拟合,确定多项式中的参数。这种方法可以很方便地利用标准的有限元程序(如 ABAQUS/Explicit 中的 Vumat)实现。在各种变形模式互不耦合的基础上,适用于

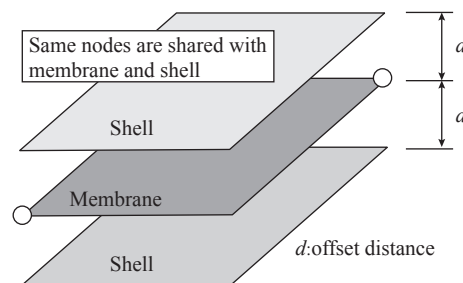


图22 共节点膜-壳单元

Fig.22 Membrane-shell element with same nodes

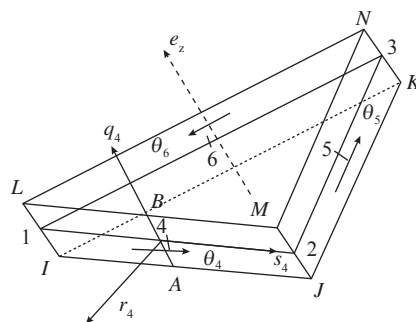


图23 基于DKT6的棱柱形实体-壳单元

Fig.23 Prismatic solid-shell element based on DKT6

织物大变形分析的超弹性本构模型纷纷被提出,如 Aimene^[55-56]、彭雄奇^[57-59]、Dridi^[60]等基于织物的经、纬向拉伸和面内剪切, Charmetant 等^[10]基于纱线的4种变形模式(轴向拉伸、横向压缩、横向扭曲、纵向剪切),都提出了用于模拟2D织物大变形行为的各向异性超弹性本构模型。Charmetant 等^[61]基于织物的6种变形模式(图25),提出了适用于大厚度3D角连锁织物大变形分析的超弹性本构模型。黄小双^[62]、胡虹玲等^[63]分别在纱线拉伸、面内剪切的基础上进一步考虑了双拉耦合和拉剪耦合效应。

2 离散方法

离散的方法,是在细观尺度研究织物的力学行为,因此也叫做细观方法,要求对织物中的每一根纱线进行几何建模,并考虑其力学性能。如果是周期性问题(几何结构、载荷、边界条件),则可通过RUC(Representative Unit Cell)来对整个织物的力学行为进行分析。几何模型的真实程度是影响这种方法准确性的重要因素,因此如何描述纱线的截面形状、空间走向、纱线间的接触行为,以及纱线的本构行为是研究这种方法的学者们所主要关注的方面。这种方法的主要优点在于其可以提供因变形所导致的织物细观结构的变化,这对于分析变形后织物的渗透率、复合材料的纤维体积含量等尤为重要。然而,众多的单元数量,以及纱线间复杂的接触、挤压、摩擦会大大增加计算时间,这些缺点大大限制了离散方法在织物成型模拟中的应用。

目前,一些软件可以很方便地建立织物的几何模型。但是,在利用这些软件建模时,或多或少需对织物的几何结构做出一定的假设,比如假设纱线的截面形状为圆形,截面沿着纱线的纵向不发生变化等。因此,这些都是理想化的模型,并且在使用这些模型进行有限元分析时,可能会发生

各纱线表面互相穿透的情况。Hivet 等^[64]提出了一套建立2D机织物单胞3D几何模型,以及对模型进行网格划分的方法。方法能够确保相邻的纱线在相互接触时,其表面不会发生互相穿透。所建立的几何模型考虑了纱线截面沿纱线轨迹的变化,这使得接触行为对纱线截面形状的影响能够在相应的有限元分析中被考虑进去。Wendling 等^[65-66]后来在此基础上,进一步提出了适用于任意机织结构形式的完全自动化建模及连续网格划分的策略,该方法高效,且可将相应模型直接导入到有限元软件中进行数值分析。

X射线微米CT(μ CT)技术近年来来被广泛应用到复合材料行业,以获取织物真实的内部细观结构。Naouar 等^[67-68]通过 μ CT得到了斜纹织物和3D NCF正交织物的内部

结构图像,并分别基于骨架化算法和灰度共生矩阵算法对图像进行处理,提取了每根纱线的几何形态,建立相应的几何模型。Brown 等^[69]使用软件ImageJ对分叉的3D机织T型梁的 μ CT图像进行了处理,并在此基础上提出了一套描述T型梁中丝束平移、弯曲和展平的数学公式。将从 μ CT图像中获取的信息,以及该织物的编织方式作为输入参数,使用TexGen的自动建模技术建立了T型梁的平板状和分叉的几何模型。Qu 等^[70]通过CT图像获得了2.5D机织预制体的细观几何结构,建立了由表面RUC与内部RUC组成的几何模型,通过细观有限元方法预测了预制体横向压实过程中压力与纤维体积含量的关系。石康君等^[71]基于灰度共生矩阵提出了一种多尺度图像特征提取方法,以用来评价服装织物

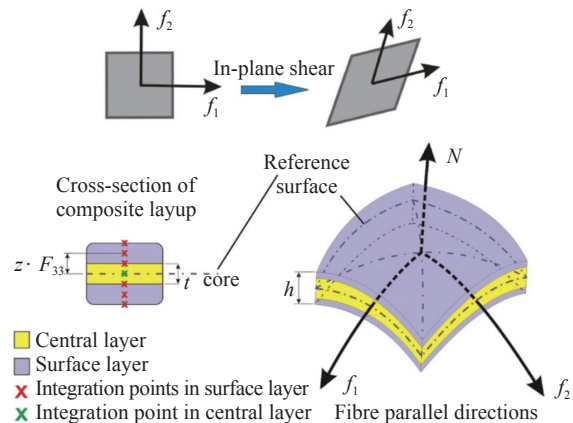


图24 三层壳单元示意图

Fig.24 Schematic diagram of laminated shell element

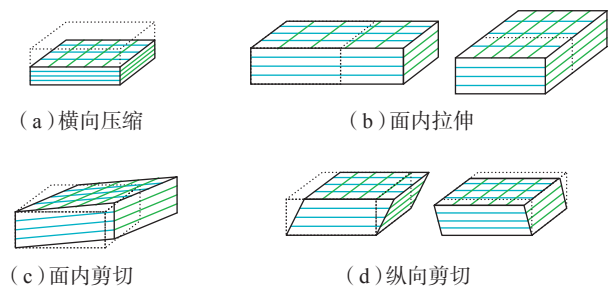


图25 织物的6种变形模式

Fig.25 Six deformation modes

的褶皱等级。

Nguyen 等^[72]对斜纹织物的横向压实行为进行了细观分析。使用 Hivet 等^[64]所提出的方法建立了织物的几何模型,纱线被视为横观各向同性体,并通过次弹性模型^[29, 73-77](亚弹性)来描述其本构行为。本构模型共包含 7 个参数,其可分别通过对织物的单向拉伸、横向压缩及在等双轴拉伸(经、纬向保持同样的拉力)的同时进行横向压缩 3 种试验来确定。Gatouillat 等^[78]使用标准的壳单元以及比较粗糙的网格建立了整个试样尺寸的细观有限元模型,纱线的本构关系采用次弹性模型。这种方法能够模拟织物因拉伸以及织物内聚力丧失所产生的纱线间的滑移。然而,纱线间大量的接触使得该方法的计算成本非常高。Wang 等^[79]使用次弹性描述纱线的本构关系,并在纱线伸长、横向压缩、横向剪切、纵向剪切变形的基础上,进一步考虑了纵向压缩所导致的屈曲以及泊松效应产生的横向膨胀变形。

Wang 等^[80]提出了“单链数字单元”(Digital Element)的概念,如图 26 所示,每一根纱线都被离散成杆单元,单元之间通过光滑铰连接,纱线间的接触行为使用接触单元模拟。Zhou 等^[81]在“单链数字单元”的基础上,进一步对纱线内的纤维单丝进行了模拟,构造了“多链数字单元”(图 27)。Miao 等^[82]针对上述方法在模拟大尺寸织物时效率低的问题,对接触单元的算法进行了改进,并用静态松弛法代替了原有的逐步模拟织造过程的方法。通过改进,计算效率得到显著提高,计算时间仅为原方法的 1%~2%。Said 等^[83]用“多链数字单元”方法模拟了大尺寸 3D 织物的压实过程,准确预测了织物变形后的内部结构。Mahadik 等^[84]用“多链数字单元”方法研究了压实对纱线卷曲、富树脂区及树脂流道尺寸和形状的影响。

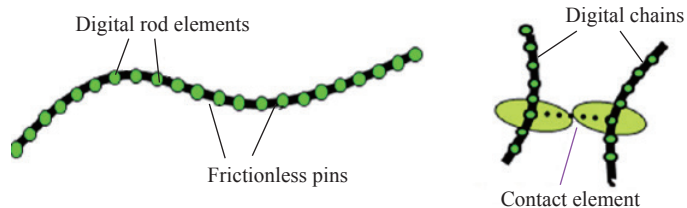


图26 单链数字单元
Fig.26 Single digital element

3 半连续方法

使用连续的方法对织物的宏观力学行为进行分析,不能得到织物变形后的内部细观结构。离散的方法因为需要模拟每一根纱线,以及纱线间的接触、摩擦等,往往需要花费大量的计算时间。半离散的方法^[85-88]作为一种折中的办法被提出。这种方法需要构造考虑织物内部细观结构的用户自定义单元(如 ABAQUS/Explicit 中的 Vuel),对于 2D 织物,可构造由织物单胞构成的 3 节点三角形膜单元,如图 28 所示^[89]。对于 3D 织物,则可构造由织物的纱线片段构成的 8 节点六面体单元,如图 29 所示^[90]。单元的构造基于虚功原理,假设单元内的纱线均为直线。主要考虑纱线的拉伸刚度对单元节点内部载荷的贡献,其他刚度(如横向压缩,面内剪切,接触等)相比于轴向拉伸刚度要小很多,其贡献可通过各向同性次弹性本构进行考虑。采用显式动力学及中心差分法求解节点加速度及单元位移场,动力学效应所带来的影响可以忽略。Luycker 等^[90]使用半离散方法模拟了大厚度 3D 角连锁织物的半球冲压成型和扭转变形。

试验研究

试验可作为验证模拟结果准确性的手段,还可为本构模型提供力学性能参数。因此,如何设计试验装置及试验方法以获得更可能准确的试验结果一直是这一领域研究的重点。



图27 多链数字单元
Fig.27 Multi-chain digital element

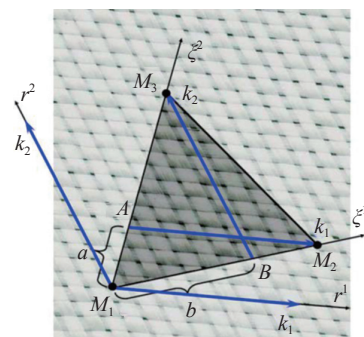


图28 由单胞构成的三角形膜单元
Fig.28 Triangular membrane element containing unit cell

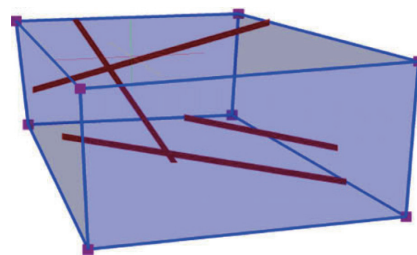


图29 由纱线片段构成的六面体单元
Fig.29 Hexahedral solid element containing yarn segments

剪切变形是预制体成型过程中的主要变形模式,目前针对织物剪切变形的试验方法主要有两种:像框剪切(图30)与偏轴拉伸(图31)。在像框剪切试验中,像框相邻的两条手臂在加载前互相垂直,纱线被垂直固定在手臂上,试样一般为正方形。在偏轴拉伸试验中,织物只有一条边被固定,经、纬纱方向与加载方向成 $\pm 45^\circ$,试样一般为长方形。张一帆^[91]和关留祥等^[92]对这两种试验方法进行了综述。两种方法各有优缺点。对于平衡织物及在理想情况下,像框剪切试验能在整个织物内产生均匀的纯剪切变形,但是试验装置比较复杂,对于试样的夹持及相邻手臂连接处的光滑程度要求比较高。偏轴拉伸试验因其试验程序简单,最初被设计用来代替像框剪切试验,然而这种方法会在织物中的不同区域产生不同剪切程度的变形如图31所示:区域I为未变形区域,区域II、区域III为纯剪切区域,且区域II的剪切角为区域III的一半。对于不平衡织物,则会产生S型或Z型变形^[36, 93]。Milani等^[94]研究了像框剪切试验中,织物的错位(与手臂不垂直)夹持对剪切力的影响。即使是一个非常小的错位角度,也可能在纱线中产生较大的拉力。而拉力会增加纱线交织处的摩擦力,从而对剪切力测量产生不可忽略的影响。尤其是在加载初期,因为这一时期剪切力的主要贡献来自于纱线交织产生的摩擦力。这种错位夹持也是像框剪切试验重复性差的一个主要原因。

通过不同的试验测试技术或仪器,可以获得织物表面的位移场或内部的细观结构,这对于建立细观几何模型以及评估模拟结果很有必要。这些试验技术大致包括以下几种:(1)可进行全场应变测量的数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术。DIC技术是一种非接触式现代光学测量试验技术,由于具有

光路简单、环境适应性好、测量范围广以及自动化程度高等诸多优点已经被广泛应用于土木工程、机械、材料科学、电子封装、生物医学、制造、焊接等许多科学及工程领域,尤其是在材料的力学性能表征方面得到了越来越广泛的应用。Dridi等^[95-96]使用DIC技术测量了3种机织物(平纹,斜纹和缎纹)在偏轴拉伸和像框剪切试验中经纱/纬纱的剪切角,Ullah等^[97-98]通过DIC技术获得了机织CFRP在面内剪切试验中的全场面内剪切应变,Kashfuddoja等^[99]基于3D DIC技术对聚合物基体和聚合物基碳纤维增强复合材料层合板进行了试验表征,Ajmal等^[100]使用3D DIC方法检测和监测带“铣槽”

机织GFRP试样中分层的疲劳增长情况。(2)原位传感器^[7]技术。这种技术是将传感器以与经纱/纬纱成一定角度地预埋在织物中,并通过测量该方向的拉伸应变来计算剪切角;这种原位测量技术使得追踪织物内部经纱/纬纱剪切角的发展历史成为可能。(3)示踪(迹)纱技术。该技术要求示踪纱与周围纱线的颜色对比强烈,以此来判断示踪纱的截面边界。唐逊等^[101]在石英织物中添加碳纤维作为示踪纱,在碳纤维织物中添加石英纱作为示踪纱,并通过追踪示踪纱的截面形状和形心坐标确定了三维机织复合材料内部纱线的真实形态。黄学峰等^[102]在以石英纤维为主体的三维机织物中

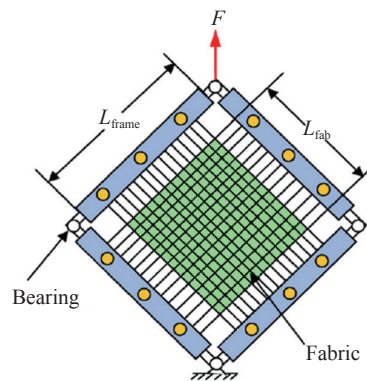


图30 像框剪切

Fig.30 Schematic diagram of picture frame shear

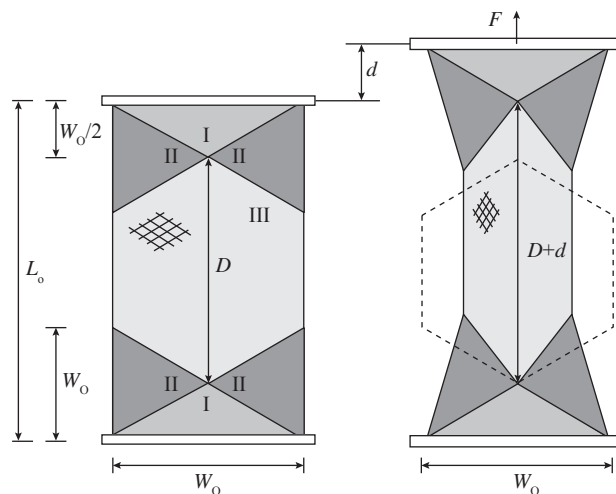


图31 偏轴拉伸

Fig.31 Schematic diagram of bias extension

布置了具有大致相同截面积的碳纤维作为示迹纱线,并在复合成型后采用剖面法观测截面中示迹纱线的外形轮廓,最后通过编制的专用的图形软件准确地提取该轮廓线,确定了纱线的截面形状近乎于椭圆。Dharmalingam 等^[103]使用共聚焦色谱仪测量并记录了在不同程度的纵向压缩的过程中,单根 E-glass 和碳纤维束横截面的演变过程,包括横截面的形状及束内纤维丝在截面中的位置,这些信息对于计算织物的渗透率非常重要。

展望

模拟预制体的铺覆及压实过程,预测预制体变形后的几何构型,对于计算预制体的渗透率、最终复合材料构件的力学性能及评估成型条件非常重要。已经有大量的数值方法用于模拟预制体的变形行为。这些方法大致可分为连续、离散以及半离散3类。连续的方法易于与标准的有限元程序相结合,但是均匀化的材料性能需要通过试验确定,成本高,并且这些试验的重复性及数据的有效性都有待进一步考证。离散的方法能够获得织物的内部细观结构,但是其准确性依赖于几何结构的真实性,且计算成本高。半离散的方法具有较高的计算效率,且能够在一定的假设条件下对织物的细观结构进行考虑。目前,还没有一种方法能够全面考虑所有因素。随着计算机运行能力的提高,不需通过试验测定不同结构整体织物的力学性能,仅考虑基本纤维束的力学性能,且能够实现自动图像识别、几何建模、网格划分以及有限元分析的细观方法也许是将来的发展方向之一。

参考文献

[1] 沈尔明,王志宏,滕佰秋,等.连续纤维增强复合材料在民用航空发动机上的应

用[J].航空发动机,2013,39(2):90-94.

[2] SHEN Erming, WANG Zhihong, TENG Baiqiu, et al. Application of continuous fiber reinforced composites in civil aeroengines[J]. Aeroengine, 2013, 39(2): 90-94.

[3] THOMPSON A J, BELNOUE JP H, HALLETT S R. A numerical study examining the formation of consolidation induced defects in dry textile composites[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 406: 012052.

[4] LIN F B, DAI Y, LI H, et al. Effect of compressive and shear deformation of 2.5D preform on its stiffness of composites[J]. Materials Science Forum, 2019, 943: 75-80.

[5] 杨云飞.纤维预制体渗透率测定方法及影响因素的研究[D].武汉:武汉理工大学,2007.

[6] YANG Yunfei. Study on permeability measurement method and influencing factors of fiber preform[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.

[7] CHEN Z M, PAN S D, ZHOU Z G, et al. The effect of shear deformation on permeability of 2.5D woven preform[J]. Materials, 2019, 12(21): 3594.

[8] 刘昊鑫,贺鹏飞,李文晓,等. RTM 工艺纤维预制体渗透率研究进展[J]. 工程塑料应用, 2019, 47: 149-152.

[9] LIU Haoxin, HE Pengfei, LI Wenxiao, et al. Research progress on permeability of fiber preform in RTM process[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47: 149-152.

[10] GEREKE T, DOBRICH O, HUBNER M, et al. Experimental and computational composite textile reinforcement forming: A review[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 46: 1-10.

[11] 汪浩,徐珍珍,阮芳涛,等.增强体织物组织结构对曲面复合材料力学性能的影响[J].中国塑料,2019,33(3):22-27.

[12] WANG Hao, XU Zhenzhen, RUAN Fangtao, et al. Effect of reinforced fabric structure on mechanical properties of curved composites[J]. China Plastics, 2019, 33(3): 22-27.

[13] KHOKAR N, 贺春霞.先进复合材料三维织物的织造[J].国际纺织导报,2018,46(11):42-44.

[14] KHOKAR N, HE Chunxia. Advanced

composite 3D fabric weaving[J]. Melliand China, 2018, 46(11): 42-44, 46.

[15] CHARMETANT A, VIDAL-SALLÉ E, BOISSE P. Hyperelastic modelling for mesoscopic analyses of composite reinforcements[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71(14): 1623-1631.

[16] 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.

[17] DIXIT A, MALI H S. Modeling techniques for predicting the mechanical properties of woven-fabric textile composites: A review[J]. Mechanics of Composite Materials, 2013, 49(1): 1-20.

[18] 刘洪玲.纺织结构复合材料中的纺织品[J].产业用纺织品,2001,19(10):7-11.

[19] LIU Hongling. Textiles in textile structural composite materials[J]. Technical Textiles, 2001, 19(10): 7-11.

[20] 单晶晶,马菲,许鹤,等.几种角连锁物结构的设计[J].成都纺织高等专科学校学报,2015,32(4):90-93.

[21] SHAN Jingjing, MA Fei, XU He, et al. Design of angle-interlock fabric structure[J]. Journal of Chengdu Textile College, 2015, 32(4): 90-93.

[22] 杨彩云.2.5维预制体结构参数的设计方法[J].纺织学报,2009,30(6):54-57.

[23] YANG Caiyun. Design method related to 2.5D preform structural parameters[J]. Journal of Textile Research, 2009, 30(6): 54-57.

[24] 李宗珀,杨彩云.不同线密度2.5D碳纤维机织物的设计与织造[J].国际纺织导报,2017,45(4):28-30,32.

[25] LI Zongpo, YANG Caiyun. Design and weaving of 2.5D carbon woven fabric with different fineness[J]. Melliand China, 2017, 45(4): 28-30, 32.

[26] 焦亚男,仇普霞,纪高宁,等.经纬向纤维体积比例对2.5D机织复合材料力学性能的影响[J].天津工业大学学报,2015,34(3):1-5.

[27] JIAO Yanan, QIU Puxia, JI Gaoning, et al. Mechanical properties of 2.5D woven composites with different volume rates in warp and weft directions[J]. Journal of Tianjin

Polytechnic University, 2015, 34(3): 1–5.

[18] PENG X Q, CAO J. A continuum mechanics-based non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2005, 36(6): 859–874.

[19] BOISSE P, ZOUARI B, GASSER A. A mesoscopic approach for the simulation of woven fibre composite forming[J]. *Composites Science and Technology*, 2005, 65(3): 429–436.

[20] 袁守忍. 麻纤维/聚丙烯 2.5 维机织复合材料的制备及力学性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013.

YUAN Shouren. Preparation and mechanical properties of flax/Poly propylene 2.5D woven composite[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.

[21] 张一帆. 三维整体结构纤维预成型型的变形机理及本构研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2013.

ZHANG Yifan. Study on deformation mechanism and constitutive structure of fiber preform with 3D integral structure[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2013.

[22] 谢永丰, 李姗姗, 陈利. 2.5 维机织纤维压缩性能实验研究[J]. *天津工业大学学报*, 2010, 29(3): 19–23.

XIE Yongfeng, LI Shanshan, CHEN Li. Experimental research on compression characteristics of 2.5D woven fabric[J]. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2010, 29(3): 19–23.

[23] 郭启微, 吴晓青. 复合材料中平纹机织物的压缩性能[J]. *纺织学报*, 2008, 29(5): 42–45.

GUO Qiwei, WU Xiaoqing. Compressibility of plain-woven fabrics in composite[J]. *Journal of Textile Research*, 2008, 29(5): 42–45.

[24] 刘刚, 李伟东, 李龙, 等. “离位”增韧预成型体压缩特性[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(4): 1194–1200.

LIU Gang, LI Weidong, LI Long, et al. Compaction properties of “ex-situ” toughened preforms[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(4): 1194–1200.

[25] 万喜莉, 孙颖, 陈利, 等. 2.5D 角联锁织物厚向压缩特性的实验研究[J]. *纺织学报*, 2015, 36(2): 49–54, 70.

WAN Xili, SUN Ying, CHEN Li,

et al. Experimental study on compaction characteristics of 2.5D angle-interlock woven fabric[J]. *Journal of Textile Research*, 2015, 36(2): 49–54, 70.

[26] 王东兴. 预成型碳纤维织物压缩成型特性及粘弹性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.

WANG Dongxing. Research on compression molding characteristics and viscoelasticity for the tackified carbon fiber fabrics[D]. Changsha: Hunan University, 2018.

[27] PRODROMOU A, CHEN J L. On the relationship between shear angle and wrinkling of textile composite preforms[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1997, 28(5): 491–503.

[28] LIU L, CHEN J L, GORCZYCA J L, et al. Modeling of friction and shear in thermostamping of composites - part II[J]. *Journal of Composite Materials*, 2004, 38(21): 1931–1947.

[29] BOISSE P, ZOUARI B, DANIEL J. Importance of in-plane shear rigidity in finite element analyses of woven fabric composite preforming[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, 37(12): 2201–2212.

[30] LAUNAY J, HIVET G, DUONG A V, et al. Experimental analysis of the influence of tensions on in plane shear behaviour of woven composite reinforcements[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(2): 506–515.

[31] HARRISON P G. Normalisation of biaxial bias extension test results considering shear tension coupling[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(9): 1546–1554.

[32] NOSRAT-NEZAMI F, GEREKE T, EBERDT C, et al. Characterisation of the shear-tension coupling of carbon-fibre fabric under controlled membrane tensions for precise simulative predictions of industrial preforming processes[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, 67: 131–139.

[33] 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.

[34] BOISSE P, GUZMAN-

MALDONADO E, WANG P, et al. Wrinkling and bending during forming of multi-layered textile composite[C]// *Proceedings of The 22nd International Esaform Conference on Material Forming: Esaform*, 2019.

[35] BUSSETTA P, CORREIA N. Numerical forming of continuous fibre reinforced composite material: A review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 113: 12–31.

[36] BARBAGALLO G, MADEO A, AZEHAF I, et al. Bias extension test on an unbalanced woven composite reinforcement: Experiments and modeling via a second-gradient continuum approach[J]. *Journal of Composite Materials*, 2017, 51(2): 0021998316643577.

[37] BARBAGALLO G, MADEO A, MORESTIN F, et al. Modelling the deep drawing of a 3D woven fabric with a second gradient model[J]. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 2017, 22(11): 1081286516663999.

[38] 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.

[39] MADEO A, FERRETTI M, DELL' ISOLA F, et al. Thick fibrous composite reinforcements behave as special second-gradient materials: Three-point bending of 3D interlocks[J]. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik*, 2015, 66(4): 2041–2060.

[40] 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.

[41] DE BILBAO E, SOULAT D, HIVET G, et al. Experimental study of bending behaviour of reinforcements[J]. *Experimental Mechanics*, 2010, 50(3): 333–351.

[42] WANG J, LONG A C, CLIFFORD M J, et al. Energy analysis of reinforcement deformations during viscous textile composite forming[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2007, 907(1): 1098–1106.

[43] 刘飞, 贺卫亮. 弯曲刚度对织物

膜材褶皱特性影响仿真分析[J]. 计算机仿真, 2015, 32(4): 95–100.

LIU Fei, HE Weiliang. The effect of bending stiffness on fabric membrane wrinkle analysis[J]. Computer Simulation, 2015, 32(4): 95–100.

[44] 丁纺纺, 彭雄奇. 复合材料用机织物非正交本构模型的半球形冲压成型验证[J]. 复合材料学报, 2011, 28(1): 156–160.

DING Fangfang, PENG Xiongqi. Validation of a non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics via hemispherical stamping simulation[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(1): 156–160.

[45] Zia-Ur-Rehman, 彭雄奇, 石少卿, 等. 机织复合材料双球型冲压的有限元模拟[J]. 中国机械工程, 2011, 22(6): 728–731.

Zia-Ur-Rehman, PENG Xiongqi, SHI Shaoqing, et al. Finite element simulation of double ball punching of woven composites [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(6): 728–731.

[46] PENG X Q, 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.

[47] YU W R, POURBOGHRAT F, CHUNG K, et al. Non-orthogonal constitutive equation for woven fabric reinforced thermoplastic composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002, 33(8): 1095–1105.

[48] YU W, HARRISON P G, LONG A. Finite element forming simulation for non-crimp fabrics using a non-orthogonal constitutive equation[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(8): 1079–1093.

[49] LEE W, CAO J, BADEL P, et al. Non-orthogonal constitutive model for woven composites incorporating tensile effect on shear behavior[J]. International Journal of Material Forming, 2008, 1(1): 891–894.

[50] 张必超, 彭雄奇, 黄小双. 考虑双拉耦合的复合材料编织物非正交本构模型[J]. 应用数学和力学, 2016, 37(3): 227–234.

ZHANG Bichao, PENG Xiongqi, HUANG Xiaoshuang. A nonorthogonal constitutive model for woven composites involving biaxial

tension coupling[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2016, 37(3): 227–234.

[51] 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.

[52] NISHII M, HIRASHIMA T, KURASHIKI T. Dry fabric forming analysis considering the influence of tensions on in-plane shear behavior[J]. Journal of the Japan Society for Testing Materials, 2014, 63(5): 380–385.

[53] XIONG H, MALDONADO E G, HAMILA N, et al. A prismatic solid-shell finite element based on a DKT approach with efficient calculation of through the thickness deformation[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2018, 151: 18–33.

[54] CHEN S, ENDRUWEIT A, HARPER L T, et al. Inter-ply stitching optimisation of highly drape able multi-ply preforms[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 71: 144–156.

[55] AIMÈNE Y, VIDAL-SALLÉ E, HAGÈGE B, et al. A hyperelastic approach for composite reinforcement large deformation analysis[J]. Journal of Composite Materials, 2010, 44(1): 5–26.

[56] AIMENE Y, HAGEGE B, SIDOROFF F, et al. Hyperelastic approach for composite reinforcement forming simulations[J]. International Journal of Material Forming, 2008, 1(1): 811–814.

[57] PENG X Q, GUO Z Y, DU T L, et al. A simple anisotropic hyperelastic constitutive model for textile fabrics with application to forming simulation[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 52: 275–281.

[58] 彭雄奇, 堵同亮, 郭早阳. 机织复合材料各向异性超弹性本构模型[J]. 机械工程学报, 2012, 48(20): 45–50.

PENG Xiongqi, DU Tongliang, GUO Zaoyang. Anisotropic hyperelastic constitutive model for woven composite fabrics under large deformation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(20): 45–50.

[59] 彭雄奇, Zia-Ur-Rehman, 丁纺纺. 机织复合材料的一种简单的纤维加强各向异性超弹性本构模型 [C]// 第十六届全国复合材料学术年会 (NCCM-16). 长沙, 2016.

PENG Xiongqi, ZIA-UR-Rehman, DING Fangfang. A simple fiber reinforced anisotropic hyperelastic constitutive model for woven composites[C]// The 16th National Annual Conference on Composite Materials (NCCM-16). Changsha, 2016.

[60] DRIDI S, DOGUI A, BOISSE P. Finite element analysis of bias extension test using an orthotropic hyperelastic continuum model for woven fabric[J]. Journal of the Textile Institute, 2011, 102(9): 781–789.

[61] 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.

[62] 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 Xiaoshuang, YAO Yuan, PENG Xiongqi, et al. Anisotropic hyperelastic constitutive model with biaxial tension coupling for woven fabric composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(10): 2319–2324.

[63] 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 Hongling, GONG Youkun, PENG Xiongqi, et al. An anisotropic hyperelastic coupling for constitutive model considering shear-tension 2-dimensional woven fabrics[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(6): 1388–1393.

[64] HIVET G, BOISSE P. Consistent 3D geometrical model of fabric elementary cell. Application to a meshing preprocessor for 3D finite element analysis[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2005, 42(1): 25–49.

[65] WENDLING A, DANIEL J L, HIVET G, et al. Meshing preprocessor for the mesoscopic 3D finite element simulation of 2D and interlock fabric deformation[J]. Applied Composite Materials, 2015, 22(6): 869–886.

[66] WENDLING A, HIVET G, VIDAL-SALLÉ E, et al. Consistent geometrical modelling of interlock fabrics[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2014, 90: 93–105.

- [67] NAOUAR N, VIDAL-SALLE E, SCHNEIDER J, et al. 3D composite reinforcement meso FE. analyses based on X-ray computed tomography[J]. *Composite Structures*, 2015, 132: 1094–1104.
- [68] 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.
- [69] BROWN L P, YAN S, ZENG X, et al. Mesoscale geometric modelling of bifurcation in 3D woven T-beam preforms[C]// 12th International Conference on Textile Composites. 2015.
- [70] QU Y, DAI Y, LI H. Transverse compaction analysis of 2.5D preform composite[J]. *Key Engineering Materials*, 2017, 729: 51–57.
- [71] 石康君,王静安,高卫东. 织物褶皱多尺度灰度共生矩阵分析[J]. *丝绸*, 2020, 57(2): 35–40.
- SHI Kangjun, WANG Jingan, GAO Weidong. Multi scale gray level cooccurrence matrix analysis of fabric folds [J]. *Silk*, 2020, 57(2): 35–40.
- [72] 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.
- [73] BOISSE P, GASSER A, HAGEGE B, et al. Analysis of the mechanical behavior of woven fibrous material using virtual tests at the unit cell level[J]. *Journal of Materials Science*, 2005, 40(22): 5955–5962.
- [74] BADEL P, VIDAL-SALLE E, BOISSE P. Computational analysis of the mechanical behavior of textile composite reinforcements[C]// AIP Conference Proceedings, 2007.
- [75] BADEL P, VIDAL-SALLÉ E, BOISSE P. Computational determination of in-plane shear mechanical behaviour of textile composite reinforcements[J]. *Computational Materials Science*, 2007, 40(4): 439–448.
- [76] BADEL P, VIDAL-SALLÉ E, BOISSE P. Large deformation analysis of fibrous materials using rate constitutive equations[J]. *Computers & Structures*, 2008, 86(11–12): 1164–1175.
- [77] BADEL P, VIDAL-SALLÉ E, MAIRE E, et al. Simulation and tomography analysis of textile composite reinforcement deformation at the mesoscopic scale[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(12): 2433–2440.
- [78] GATOUILLAT 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.
- [79] WANG D, NAOUAR N, VIDAL-SALLE E, et al. Longitudinal compression and Poisson ratio of fiber yarns in meso-scale finite element modeling of composite reinforcements[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 141: 9–19.
- [80] WANG Y Q, SUN X K. Digital-element simulation of textile processes[J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(2): 311–319.
- [81] ZHOU G M, SUN X K, WANG Y Q. Multi-chain digital element analysis in textile mechanics[J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64(2): 239–244.
- [82] MIAO Y Y, ZHOU E, WANG Y Q, et al. Mechanics of textile composites: Micro-geometry[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(7): 1671–1678.
- [83] SAID B E, GREEN S, HALLETT S R. Kinematic modelling of 3D woven fabric deformation for structural scale features[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, 57: 95–107.
- [84] MAHADIK Y, ROBSON B K A, 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.
- [85] HAMILA N, BOISSE P, CHATEL S. Finite element simulation of composite reinforcement draping using a three node semi discrete triangle[J]. *International Journal of Material Forming*, 2008, 1(1): 867–870.
- [86] HAMILA N, BOISSE P. Simulations of textile composite reinforcement draping using a new semi-discrete three node finite element[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2008, 39(6): 999–1010.
- [87] HAMILA N, BOISSE P, CHATEL S. Semi-discrete shell finite elements for textile composite forming simulation[J]. *International Journal of Material Forming*, 2009, 2(1): 169–172.
- [88] BOISSE P, AIMENE Y, DOGUI A, et al. Hypoelastic, hyperelastic, discrete and semi-discrete approaches for textile composite reinforcement forming[J]. *International Journal of Material Forming*, 2010, 3(2): 1229–1240.
- [89] HAMILA N, BOISSE P. A meso-macro three node finite element for draping of textile composite preforms[J]. *Applied Composite Materials*, 2007, 14(4): 235–250.
- [90] DE LUYCKER E, MORESTIN F, BOISSE P, et al. Simulation of 3D interlock composite preforming[J]. *Composite Structures*, 2009, 88(4): 615–623.
- [91] 张一帆,陈利,李金超,等. 机织结构预成型体本构关系和剪切性能[J]. *宇航材料工艺*, 2010, 40(4): 16–22.
- ZHANG Yifan, CHEN Li, LI Jinchao, et al. Constitutive relationships and shear properties of woven preforms[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2010, 40(4): 16–22.
- [92] 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 Liuxiang, LI Jialu, JIAO Yanan, et al. Review of 3D woven preforms for the composite blades of aero engine[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(4): 748–759.
- [93] 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 Liuxiang, LI Jialu, JIAO Yanan, et al. Off axis tensile properties of unbalanced 2.5D carbon fiber woven preform [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(2): 293–301.
- [94] MILANI A S, NEMES J A, ABEYARATNE R C, et al. A method for the approximation of non-uniform fiber misalignment in textile composites using picture frame test[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, 38(6): 1493–

1501.

[95] DRIDI S, MABROUKI T, MORESTIN F, et al. Experimental analysis of Bias Extension and picture frame tests for woven fabric by digital image correlation[C]// International Conference of Applied Research in Textile. Tunise, 2008.

[96] DRIDI S, MORESTIN F, DOGUI A. Use of digital image correlation to analyse the shearing deformation in woven fabric[J]. Experimental Techniques, 2012, 36(5): 46–52.

[97] ULLAH H, HARLAND A R, SILBERSCHMIDT V V. Damage modelling in woven-fabric CFRP laminates under large-deflection bending[J]. Computational Materials Science, 2012, 64: 130–135.

[98] ULLAH H, HARLAND A R, SILBERSCHMIDT V V. Characterisation of mechanical behaviour and damage analysis of 2D woven composites under bending[J].

Composites Part B: Engineering, 2015, 75: 156–166.

[99] KASHFUDDOJA M, PRASATH R G R, RAMJI M. Study on experimental characterization of carbon fiber reinforced polymer panel using digital image correlation: A sensitivity analysis[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 62: 17–30.

[100] AJMAL O Z, CROCOMBE A D, GOWER M R L, et al. A comparison of the use of 3D dic and thermography in determining the size and growth of delaminations in woven gfrp epoxy laminates[C]// The 21st International Composite Materials Conference. Xi'an, 2017.

[101] 唐逊, 周光明, 刘旭波, 等. 三维机织复合材料纱线观测与细观几何模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(3): 376–379.

TANG Xun, ZHOU Guangming, LIU Xubo, et al. Yarn observing and meso geometry

modeling of 3D woven composites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 40(3): 376–379.

[102] 黄学峰, 张立泉, 朱梦蝶, 等. 三维机织复合材料力学性能分析与研究[J]. 玻璃纤维, 2011(3): 13–17.

HUANG Xuefeng, ZHANG Liquan, ZHU Mengdie, et al. Analysis and research on mechanical properties of 3D woven composites[J]. Fiber Glass, 2011(3): 13–17.

[103] DHARMALINGAM A S, HEMMER J, LECTEZ A S, et al. Evolution of single carbon and glass fibrous tow cross-sections in dry and lubricated states during compaction perpendicular to the fibers[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 148: 235–242.

通讯作者: 贺鹏飞, 教授, 研究方向为复合材料力学、计算力学, E-mail: ph232@tongji.edu.cn.

A Review of Study on Deformation of Textile Composite Preforms

GUAN Wei, LI Wenxiao, DAI Ying, HE Pengfei

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

[ABSTRACT] The textile composite materials, as reinforced by fabrics with good integrity, overcome the shortcomings of traditional ones, such as low interlaminar shear strength, poor resistance to delamination, sensitive to cracking. Moreover, they have excellent near-net-forming ability and are easy to be molded. These advantages have led to the increasing use of these composite materials in aerospace, marine, automotive, medical devices, and other fields. Deformability of textile preform has important effects on its permeability and the mechanical properties of the final composite parts. The aim of this paper is to provide an review on the current state of the studies on the deformation of textile preforms. It starts by briefly introducing the structural characteristics of 2D and 3D fabrics, then the tensile, transverse compression, in-plane shear and out-of-plane bending deformation mechanisms of fabrics are elaborated. The research progress of deformation of textile preforms is summarized based on numerical simulation and experimental tests. Finally, the challenges and outlook of the numerical simulation on the deformation of preforms are outlined.

Keywords: Textile preforms; Fabric structure; Deformation mechanism; Numerical simulation; Experimental method

(责编 大漠)