编织复合材料预制体铺覆成型的数值模拟

王　波[1]　　李　昂[2]　　杨振宇[2]

（1　中国航空工业集团有限公司防务工程部,北京　100022）

（2　北京航空航天大学固体力学所,北京　100083）

文　摘　针对平面编织复合材料预制体在曲面铺覆过程中的局部变形,建立了三维有限元模型,利用商业有限元软件 Abaqus 模拟了预制体在铺覆成型过程中的纤维束变形规律。研究了 0°和 45°碳纤维织物在球面铺覆过程的变形过程和局部剪切变形。结果表明,纤维束之间的滑动和纤维束起皱是该预制体在球面铺覆过程中的典型变形模式。在 0°织物的球形铺覆变形中,0°和 90°纤维束的剪切变形角最小,45°方向纤维束的剪切变形角最大;在 45°织物的铺覆变形中,0°和 90°纤维束的剪切变形角最大,45°方向纤维束的剪切变形角最小。

关键词　编织复合材料,预制体,铺覆成型,有限元法

中图分类号:TB3　　DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2019.02.004

Numerical Simulations on Draping of Woven Composites Preforms

WANG Bo[1]　　LI Ang[2]　　YANG Zhenyu[2]

（1　Defense Engineering Department, Aviation Industry Corporation of China, Beijing　100022）

（2　Institute of Solid Mechanics, Beihang University, Beijing　100083）

Abstract　In this paper, a three-dimensional finite element model is established for the local deformation of the woven composite preforms during the draping. The commercial finite element software Abaqus is employed to predict the deformation of the carbon fiber preform in a spherical draping. The deformation process of the 0° and 45° carbon fabrics in the spherical draping process is studied. The results show that sliding between fibers and wrinkling of fibers are the typical deformation modes of the preform during the spherical draping. In the spherical draping deformation of 0° fabric, the shear deformation angle of the 0° and 90° fiber bundles is the smallest, and the shear deformation angle of the fiber bundle is the largest in the 45° direction; for the 45° fabric, the shear deformation angles of the 0° and 90° fiber bundles are the largest, and that of the fiber bundle in the 45° direction is the smallest.

Key words　Woven composites, Performs, Draping, Finite element method

0　引言

编织复合材料在航空航天、船舶和汽车等领域具有非常广泛的应用。随着结构的复杂程度不断提高,编织复合材料常常需要制备具有复杂曲率的三维结构,比如球面、锥面等[1]。平面编织复合材料在纤维铺覆过程中,需要根据结构的形状对预制体施加预先的变形,因此铺覆过程中纤维的位置、纤维取向和局部纤维体积分数会重新分布。复合材料内部的纤维分布和取向决定了各类载荷作用下的复合材料内部的传力路径,纱线束之间的相互作用形式也决定了复合材料的损伤和破坏机制[2]。因此,获取预制体铺覆成型后纤维束的变形规律,对于认识最终复合材料结构的整体力学性能至关重要。

关于纤维预制体的在铺覆过程中的变形研究,受到国内外学者的广泛关注。C.MACK 等[3]提出了渔网模型对织物的铺覆过程进行了预测,建立了可以适用于大部分曲面的通用微分方程,并且利用半球铺覆实验验证了其可行性。R.E.ROBERTSON 等[4]在渔网模型基础上提出了更接近实际的纤维假设,可以更加精确的预测连续纤维织物的无褶皱铺覆。此后,研

收稿日期:2018-06-25

基金项目:国防工业技术发展计划(JCKY2016601B001, JCKY2016205C001)

第一作者简介:王波,1978 年出生,博士,高级工程师,主要从事直升机动力学和复合材料结构设计工作。E-mail:36775952@qq.com

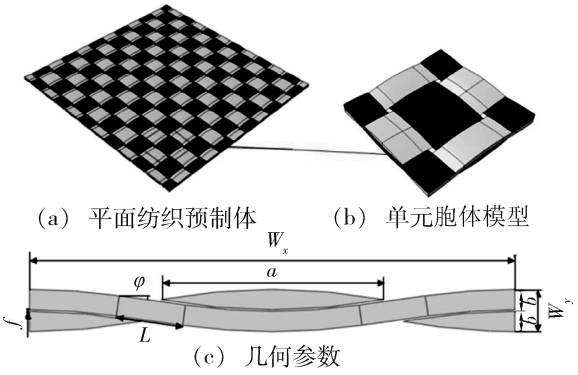
究者对渔网模型的映射算法、假设和初始条件等进行了完善[5],并将渔网法应用到了更加复杂的曲面上,如双曲率曲面[6-7]。为了准确的仿真织物铺覆过程中的变形过程,有限元方法开始在编织复合材料铺覆的仿真预测中被广泛的开发和采用[8]。M.A.KHAN等[9]建立了一种以3D桁架单元代替单向纤维、以3D膜单元代替树脂的预浸料模型。M.DUHOVIC等[10]通过模拟纤维的实际制造过程开始着重于模拟纤维中复杂的接触关系,并且以3D梁单元来模拟单向纤维。彭雄奇等[11]基于各向异性超弹性本构模型,研究了碳纤维编织复合材料在冲压成型过程中的纤维重新排布和重新取向,并通过实验对数值模拟进行了验证。

本文通过建立平面编织复合材料球形铺覆的有限元模型,模拟了碳纤维平面编织预制体在成型过程中纤维束的变形规律,详细分析了各个部位的纤维位置和取向的变化。本文的研究为评估预制体质量以及后续预测结构的整体力学行为提供了有意义的参考。

1 有限元模型

1.1 平面编织复合材料预制体单胞结构

图1为单胞模型的几何尺寸示意图,其中纱线束的横截面几何尺寸 a,b 是纱线的横截面长、短轴的长度。单胞模型中的单胞经纱/纬纱方向长度 W_x 与单层平纹织物厚度方向上的长度 W_y 决定了单元胞体的大小。单元胞体模型中几何参数之间的关系可由如下的公式计算而得。



(a) 平面纺织预制体　(b) 单元胞体模型

(c) 几何参数

图1 平面编织预制体的单元胞体模型

Fig.1 Unit cell model for the plane woven composites preforms

纱线束曲率半径大小 R 为

$$R = \frac{a^2 + b^2}{4b} \tag{1}$$

纱线束之间厚度方向的间隙大小 f 为

$$f = \frac{1}{2}W_y - b \tag{2}$$

根据纤维间的集合关系,纱线束直线段的长度大小 L 为

$$L = \sqrt{(2R + f)^2 + \frac{1}{4}L_x^2 - (2R + 2f + b)^2} \tag{3}$$

纱线束横截面的面积大小 S 为

$$S = 2R^2 \arcsin\frac{a}{2R} - \left(R - \frac{b}{2}\right)a \tag{4}$$

纱线束中直段的倾角 φ 的大小为

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{W_x}{2\sqrt{L^2 + (2R + 2f + b)^2}}\right) - \arcsin\left(\frac{L}{\sqrt{L^2 + (2R + 2f + b)^2}}\right) \tag{5}$$

由于经纱和纬纱方向上,单胞模型各包含两条纱线束长度的纤维,因此单胞模型中单方向的完整纱线束长度 L_0 为

$$L_0 = 8\varphi\left(R + \frac{1}{2}d + f\right) + 4L \tag{6}$$

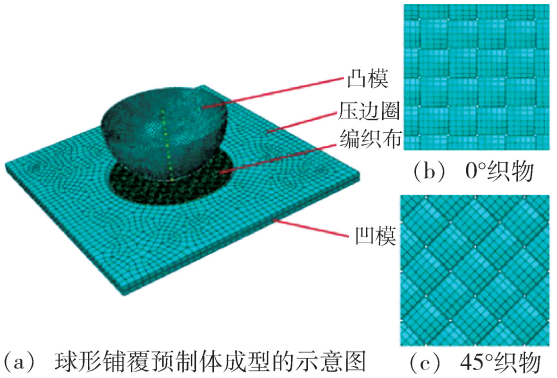
纤维体积分数 V 为

$$V = \frac{\eta S L_0 + \eta S L_0}{W_x W_y W_z} = \frac{\eta S[16\varphi(R + \frac{1}{2}d + f) + 8L]}{W_x^2 W_y} \tag{7}$$

式中,η 为纤维敛集率。根据以上参数之间的联系[12],即可在有限元软件中构建出平面编织复合材料的单元胞体模型。

1.2 预制体成型的有限元模型

平纹织物预制体的球形铺覆实验如图2所示,采用一个球形压头对纤维布作为一个整体进行冲压。



(a) 球形铺覆预制体成型的示意图　(b) 0°织物　(c) 45°织物

图2 铺覆成型的有限元模型

Fig.2 Finite element model for the draping

为了保证模型网格的计算精度,纱线束均采用结构化网格,并选择Abaqus中的线性减缩积分单元C3D8R。由于经纱和纬纱的边界处由于截面变化较大,需要对截面进行网格细分来控制边界处网格的质量。同时,为了减小求解器的计算量,我们将装配网

格模型分别导出为经纱纬纱的孤立网格,这样在不进行质量缩放的情况下大大提高模型计算效率。

由于纤维预制体在受到冲压作用而变形的过程中涉及到大量的接触作用,本文中均采用罚函数的方法来处理接触问题。惩罚接触力可以表示为

$$f = k(d_{\text{cur}} - d_0) \tag{8}$$

式中,k 是惩罚刚度,d_0 是未解决过程的初始补偿距离,d_{cur}是当前补偿距离。如果 d_{cur} 减小至 d_0,则将 d_0 重置为 d_{cur}。标准的库仑摩擦模型认为,当等效摩擦应力 τ_{eq} 小于与接触压力 p 成比例的临界应力 $\tau_{\text{crit}} = \mu p$ 时不产生滑移。

因此,可以根据临界剪应力提出滑移条件如下

$$\tau_{\text{crit}} = \min(\mu p, \tau_{\max}) \tag{9}$$

式中,$\tau_{\max}$ 为用户自定义的最大剪应力值。在等效应力大于等于临界应力时,会发生滑移。如果此时摩擦是各向同性的,则滑移的方向和摩擦应力方向一致,则有

$$\frac{\tau_i}{\tau_{\text{eq}}} = \frac{\dot{\gamma}_i}{\dot{\gamma}_{\text{eq}}} \tag{10}$$

式中,$\dot{\gamma}_i$ 是在 i 方向上的滑动速率,$\dot{\gamma}_{\text{eq}}$ 是等效滑移速度的大小,且满足

$$\dot{\gamma}_{\text{eq}} = \sqrt{\dot{\gamma}_1^2 + \dot{\gamma}_2^2} \tag{11}$$

根据库仑模型,摩擦系数被定义为一个与等效滑移速率和接触压力有关的公式

$$\mu = f(\dot{\gamma}_{\text{eq}}, p) \tag{12}$$

因此,本文中摩擦系数只与滑移速率和接触压力有关。根据已有实验,本文模拟中采用的纤维束间的摩擦系数为 0.22[13],摩擦性质的方向性为各向同性。

2 结果与讨论

2.1 织物的铺覆变形

由图 3 可见,随着半球模具的冲压作用,0°纤维预制体不断向半球表面铺覆。同时由于压边圈的作用,大部分纤维呈拉伸状态。对于纤维取向为 0°和 90°的纤维来说,其在轴向的弹性模量远大于其横向上的弹性模量,因此纤维预制体的 0°和 90°方向上的纤维拉伸变形较为明显,边界中点附近产生了很大的向内缩进,边角处几乎无缩进。45°方向上相邻经纬纱之间的角度变化较为明显,可以看出这部分纤维主要靠互相之间的角度变化来适应整体结构的大变形过程。图 4 为 45°纤维预制体在半球表面铺覆过程的变形情况,边角附近产生了很大的向内缩进,而边界中点缩进并不明显。0°和 90°方向上相邻经/纬纱之间的角度变化较为显著,表明存在较大的局部剪切变形。

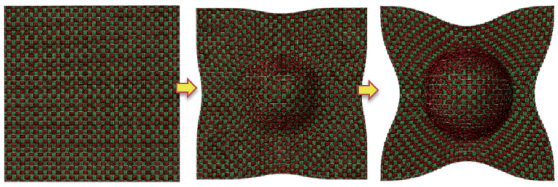


图 3 0°织物的变形过程

Fig.3 Deformation process of the 0° fabric

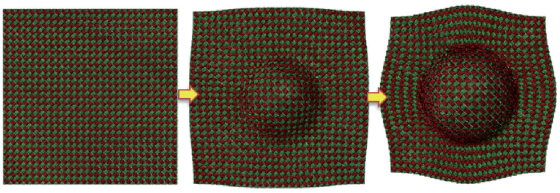


图 4 45°织物的变形过程

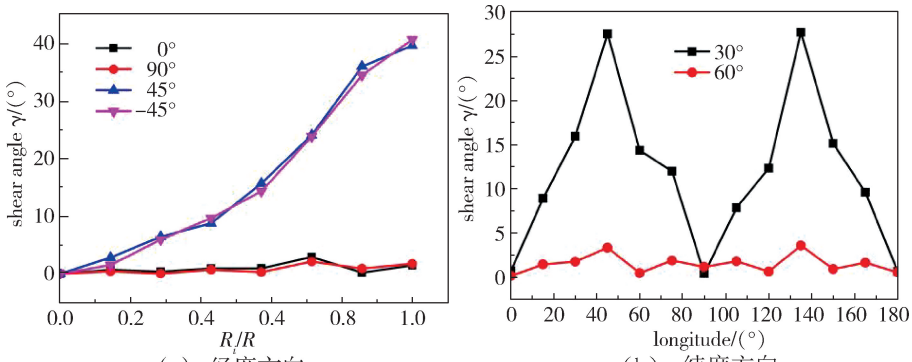
Fig.4 Deformation process of the 45° fabric

2.2 纤维束的局部变形

图 5 给出了 0°平纹编织碳纤维预制体在半球曲面上的纤维局部剪切变形角分布情况,其中图 5(a)横坐标为测量点处的半径 R_i 与半球半径 R 之比。由图 5(a)可以看出,纤维预制体在 0°和 90°两个方向上的剪切变形角十分接近于 0,变化趋势趋于平缓。很显然这是由于 0°织物的纤维取向为 0°和 90°,碳纤维在这个方向的铺覆成型过程中主要承受轴向拉伸作用,变形主要为轴向变形。同时碳纤维的轴向拉伸模量较大,因此相邻纱线间并没有产生明显的角度变化;相反,在±45°上的纤维随着数据点的位置 R_i/R 的增大,剪切变形角不断增大,且变化趋势越来越快,最终在临近半球赤道处达到了剪切变形角的最大值 40.66°,并产生了局部起皱现象。这主要是由于在±45°方向,纤维轴向和横向均受力,而碳纤维的横向弹性模量远低于其拉伸模量,因此在横向产生的变形远大于轴向,导致纱线间产生的角度变化较大,剪切变形明显。同时相邻纱线间的缝隙也相应增大,局部产生明显的间隙缺陷。在半球面上,纬度 60°处,纤维预制体的纤维取向的变化较小,剪切变形不明显,如图 5(b)所示。而在纬度为 30°处,纤维预制体的纤维取向的变化较大,基本规律为 0°、90°、180°经线处剪切变形角趋近于 0;在 45°和 135°经线处剪切变形角分别达到最大值 27.6°和 27.8°,同时 0°~90°区域和 90°~180°经线区域的变化规律基本呈对称趋势。

同样,图 6 给出了 45°平纹编织碳纤维预制体在半球曲面上的局部剪切变形角分布情况。由图 6(a)可以看出,碳纤维预制体在 45°和-45°两个方向上的剪切变形角十分接近于 0,变化并不显著。相反,在 0°和 90°上纤维的剪切变形角随着半径比 R_i/R 不断增大,最终在临近半球赤道处达到了剪切变形角的最

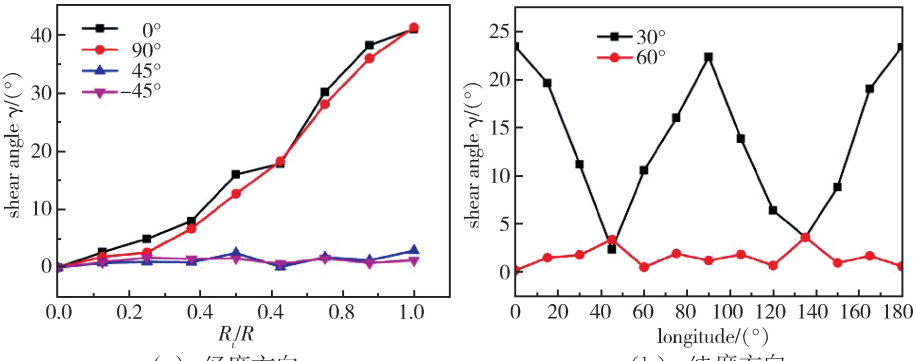
大值41.29°。图6(b)可见,在纬度60°处,纤维预制体的纤维取向的变化较小,剪切变形不明显;而在纬度30°处,纤维预制体的纤维取向的变化较大。表现为45°、135°处纤维的剪切变形角趋近于0°,而在0°、180°和90°经线处剪切变形角分别达到最大值23.5°、22.4°和23.5°,同时0°~90°区域和90°~180°经线区域的变化规律呈对称趋势。



(a) 经度方向　(b) 纬度方向

图5　0°织物半球曲面上不同方向的纤维局部剪切变形角分布

Fig.5　Local shear deformation angle distribution of fibers in different directions on the hemispherical surface of 0° fabric



(a) 经度方向　(b) 纬度方向

图6　45°织物半球曲面上不同方向的纤维局部剪切变形角分布

Fig.6　Local shear deformation angle distribution of fibers in different directions on a hemispherical surface of 45° fabric

通过数值模拟的结果与已有实验之间的对比(图7),可以发现本文的有限元模拟很好的预测了球形曲面铺覆中平面编织纤维网络的变形。

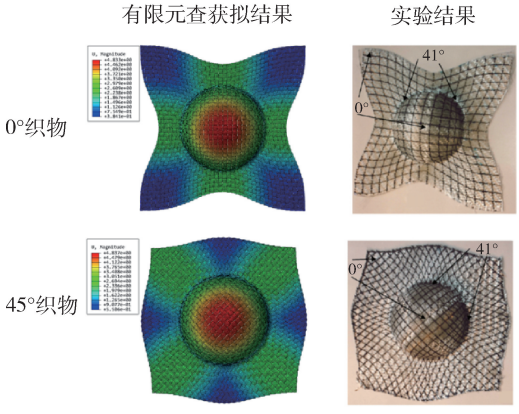


图7　数值模拟结果与实验[14]的对比

Fig.7　Comparison between the numerical simulation and experiments

从成型过程中纤维整体的变形规律来看,预制体中纱线都会受到的拉伸、压缩和剪切,其中拉伸导致了边界的缩进;压缩(主要由压边圈限制作用)导致了部分纤维的屈曲;剪切导致了纤维层间的大角度变化。这三者的共同作用之外还会产生层间滑动和起皱等缺陷,如图8所示。

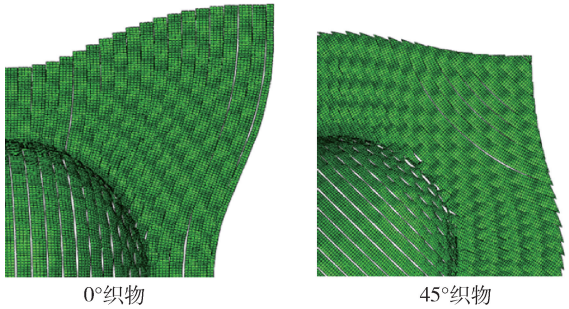


图8　纤维束之间的滑动和弯曲变形

Fig.8　Sliding between fiber bundles and bending deformation

起皱是由于纤维预制体在铺覆过程中需要由平面转变为三维曲面,因此在平面向曲面过渡的区域内

预制体局部的几何形状会发生突变,单元会产生较大的变形,即纱线间产生更大的接触压力。此时在过渡区域会产生局部的较大的压缩变形,纤维会发生类似梁的“翘曲”,使得半球赤道处的过渡区域的经纱和纬纱发生起皱现象,与 BOISSE 等[15]提出的由于纱线压缩变形导致的起皱现象吻合。

3 结论

本文采用有限元法分别对 0°和 45°碳纤维平面编织布在球形压头冲压成型的过程进行了仿真,获得了与实验一致的变形模式,详细分析了纤维束在成型过程中的剪切变形与分布情况。这些数据对不同取向编织物铺覆成型的结构设计和编织布的剪裁具有重要的意义,对于该碳纤维布的成型性能的准确预测,也具有很强的实际应用价值。通过对比分析,得到了以下结论:

(1)滑动和起皱是编织复合材料预制体在球面铺覆过程中的典型变形模式,纤维的局部剪切变形角可以用作碳纤维编织物铺覆成型性能的一种评判标准;

(2)铺覆过程中纤维的局部变形与织物中纤维的取向角密切相关,通过改变织物的铺层角度,可以调控成型后预制体在不同方向上纤维的变形程度;

(3)本文的有限元方法很好的预测了球形铺覆的成型过程,并且对平纹编织复合材料预制体的变形做出合理的预测,该方法还可望推广应用于其他复杂曲率的不可展曲面铺覆结构的预测。

参考文献

[1] 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.

[2] 夏燕茂,秦志刚. 二维编织复合材料力学性能分析研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料,2016(02):91-94.

[3] MACK C, TAYLOR H M. The fitting of woven cloth to surfaces [J]. Journal of the Textile Institute Transactions, 1956, 47(9): T477-T488.

[4] ROBERTSON R E, HSIUE E S, SICKAFUS E N, et al. Fiber rearrangements during the molding of continuous fiber composites. I. Flat cloth to a hemisphere [J]. Polymer composites, 1981, 2(3): 126-131.

[5] WANG J, PATON R, PAGE J R. The draping of woven fabric preforms and prepregs for production of polymer composite components [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1999, 30(6): 757-765.

[6] LAROCHE D, VU-KHANH T. Forming of woven fabric composites [J]. Journal of Composite Materials, 1994, 28(18): 1825-1839.

[7] LONG A C, RUDD C D. A simulation of reinforcement deformation during the production of preforms for liquid moulding processes[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 1994, 208(4): 269-278.

[8] DE LUCA P, LEFEBURE P, PICKETT A K. Numerical and experimental investigation of some press forming parameters of two fibre reinforced thermoplastics: APC2-AS4 and PEI-CETEX [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1998, 29(1): 101-110.

[9] 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.

[10] DUHOVIC M, BHATTACHARYYA D. Simulating the deformation mechanisms of knitted fabric composites[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2006, 37(11): 1897-1915.

[11] 堵同亮, 彭雄奇, 郭早阳,等. 碳纤维编织复合材料冲压成形实验与仿真分析[J]. 功能材料, 2013, 44(16): 2401-2405.

[12] 李阳, 肇研, 刘刚,等. 国产 CCF300 碳纤维及其 NCF 织物的性能[J]. 航空学报, 2014, 35(10):2889-2900.

[13] CHAKLADAR N D, MANDAL P, POTLURI P. Effects of inter-tow angle and tow size on carbon fibre friction [J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2014, 65(65):115-124.

[14] BADEL P, VIDAL-SALLÉ E, MAIRE E, et al. Simulation and tomography analysis of textile composite reinforcement deformation at the mesoscopic scale [J]. International Journal of Material Forming, 2009, 68(12):2433-2440.

[15] BOISSE P, HAMILA N, VIDAL E. Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses [J]. Composites Science & Technology, 2011, 71(5):683 - 692.