

基于三维打印的六角形编织物几何模型的构建

李政宁^{1,2}, 陈 革¹, Frank Ko²

(1. 东华大学 机械工程学院, 上海 201620; 2. 英属哥伦比亚大学 材料工程系, 温哥华 V6T 1Z4)

摘要: 相对于传统的编织技术,六角形编织在织物形状的兼容性、纱线交织率和纱线容积率等方面具有独特的优势。为分析六角形编织物的几何结构,先按照六角形编织方法编织出圆形预制件,由六角形编织预制件编织过程中的纱线轨迹重复性和对称性特点,绘制出初始的 CAD 模型,再利用三维打印技术打印出对应的模型。由于三维打印实体模型具有直观性,可以较为方便地观察并分析其几何结构,利用坐标变换对初始 CAD 模型进行优化,得到较为接近六角形编织预制件的三维打印模型,并对六角形编织物的微观结构进行了初步分析。

关键词: 六角形编织; 三维打印; 几何模型构建

中图分类号: TS813.39

文献标识码: B

文章编号: 1001-2044(2018)04-0057-05

Geometrical structure establishment of hexagonal braided preform aided by 3D printing

LI Zhengning^{1,2}, CHEN Ge¹, KO Frank²

(1. College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

(2. Department of Materials Engineering, University of British Columbia, Vancouver V6T 1Z4, Canada)

Abstract: Compared with traditional braiding method, hexagonal braiding method has the unique advantages of high shape compatibility, interlacing density and high volume fraction. To analyze the geometrical structure of hexagonal braided fabrics, a hexagonal preform is braided by hexagonal braiding method. Then, based on the characteristics of repeatability and concentricity of hexagonal braided preform, initial CAD model is drawn, and the corresponding model is printed by 3D printing technology. Because of the intuitiveness of the 3D printed solid model, the geometric structure of the 3D printed solid model can be easily observed and analyzed. The 3D CAD model is optimized by using the coordinate transformation to obtain the 3D printed model which is relatively close to the hexagonal braided preform, and the micro-geometric structure of hexagonal braided preform is analyzed initially.

Key words: hexagonal braiding; 3D printing; geometric structure establishment

DOI:10.16549/j.cnki.issn.1001-2044.2018.04.017

编织是一种古老的纺织工艺,由于编织物具有高损伤容限、高强度、低成本和净形织造等方面的优点,长久以来被广泛应用于复合材料加工领域。通常,编织物预制件是通过笛卡尔式编织(Cartesian braiding)和旋转式编织(Rotary braiding)得到的,但是这两种编织方法各有局限性,如堆积密度低,切向变形大和几何结构的适用性低等问题,这从某种程度上限制了它们的应用。

为了提高编织物中纱线的堆积密度和携纱器的排布密度,不列颠哥伦比亚大学的 AFML 实验室和亚琛工业大学的 ITA 研究所联合提出了六角形编织的概念,经过一系列的改进和优化,开发出一种电脑控制的模块化六角形编织机,如图 1 所示。六角形编织机由许多六边形角轮组成,并且可以根据实际编织的需要方便地进行扩展^[1]。



图 1 六角形编织机

在六角形编织机中,每个角轮可以驱动 6 个携纱器。相比 Tuzuki^[2] 编织机中驱动 4 个携纱器的角轮,在同等面积下,六角形编织机底盘上可以多放置约 18% 的携纱器。得益于通用化的设计,六角形编织机可以用来织造品类众多的多边形截面织物,如三角形、六边形、星形、分枝状织物。在织造上述截面形状织物时,只需把携纱器在底盘上排列成对应的形状,然后控制携纱器按照一定的路径在底盘上移动,便可以得到对应的织物,如图 2、3 所示^[3]。更重要的是,六角形角轮可以根据织造的要求任意转动 60°、120°、180°、240° 或 360°,具有很强的灵活性,这是传统的编织工艺,如笛卡尔式编织和旋转式编织所不能比拟的。

收稿日期: 2017-08-07

作者简介: 李政宁(1983—),男,湖北省郧西县人,在读博士,主要从事新型纺织机械与纺织复合材料的研究。

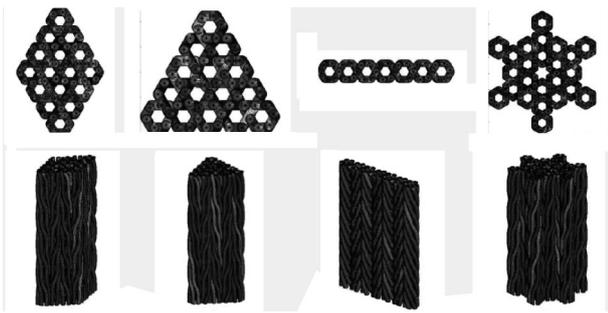


图2 携纱器在底盘上的排布和对应的织物形状

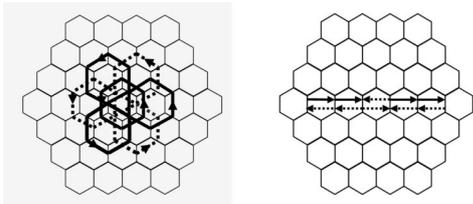


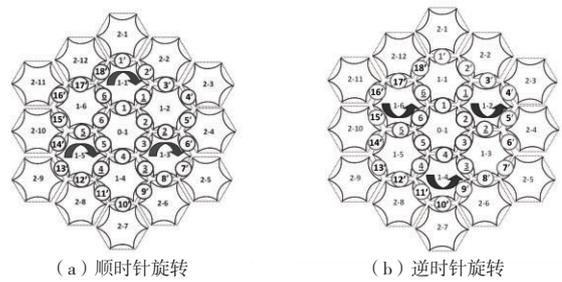
图3 携纱器不同的移动路径

六角形编织预制件的几何结构会随着携纱器路径的变化而改变。为了对每一种特定编织物的机械特性和力学性能进行分析和预测,必须要明晰它们的空间几何结构,一般而言采取划分单胞体的方法来定义微观几何结构^[4]。与试验编织机上机布置和织造过程不同,三维打印(3D Printing)或称增材成形(Additive Manufacturing)是一种快速造型技术,它不需要繁琐的上机设置和准备工作,方便构建和制造复杂的结构和模型。用CAD软件设计好模型后,将模型导入切片软件进行处理,这时切片软件会将模型分割为若干层,生成相应的G代码,以控制喷头电动机的运动;之后将G代码导入三维打印机,三维打印机中的控制电动机就会根据G代码的指令带动喷头,一层一层地把材料平铺叠加,最后打印成形。三维打印技术的独特优势引起了研究人员将其应用于纺织材料预制件领域的兴趣,比如对三维织物拓扑结构的设计。对比传统编织物织造过程,三维打印编织物更加快速、成本更低,适用于构建复杂的织物结构模型。

1 六角形编织过程和相关参数

1.1 携纱器运行规律

六角形编织几何结构是由携纱器移动路径和携纱器排布的形状所决定的。为了研究六角形编织的过程和六角形三维织物的几何结构,首先在六角形编织机上试织了一个含有30根纱线的编织预制件。此预制件不含轴纱,30根纱线均为编织纱,携纱器在编织底盘上的排列为同心多边形,分布在7个角轮的边沿,见图4。



(a) 顺时针旋转 (b) 逆时针旋转

图4 六角形角轮转动的方式

如图4所示,中心角轮0-1在编织过程中保持静止,其他6个角轮分为两组,两组角轮依次交替旋转;每一组角轮转动的时序、方向和角度都相同:奇数序号的角轮1-1、1-3、1-5顺时针旋转,偶数序号的角轮1-2、1-4、1-6逆时针旋转,每个角轮每次转过60°。由于携纱器都位于角轮的翼缘,在角轮转动的过程中,携纱器便会按照一定的路径移动,从而带动纱线在空间形成交织得到织物。角轮转动的方向和时序见表1。

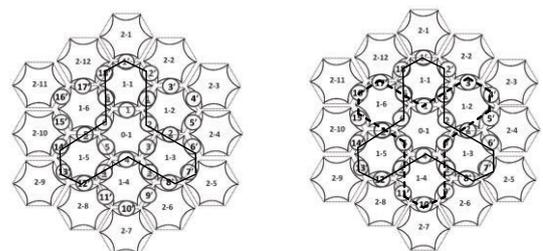
表1 角轮转动的时序和方向

角轮序号	第一步	第二步
1-1	+	
1-2		-
1-3	+	
1-4		-
1-5	+	
1-6		-

如表1所示,“+”代表角轮顺时针旋转60°,-”代表角轮逆时针旋转60°,携纱器的序号分别为1、2、3、4、5、6、1'、2'、3'、4'、5'、6'、7'、8'、9'、10'、11'、12'、13'、14'、15'、16'、17'、18',共计30个。

1.2 携纱器的路径和纱线轨迹

如果将携纱器每一步移动的位置记录下来,并用直线段依次连接,最后直线段会在x-y平面上组合成一个封闭的多边形图形,见图5。



(a) 单个携纱器在底盘上的路径 (b) 两个携纱器在底盘上的路径

图5 携纱器的移动路径

如图5所示,实线和虚线分别代表一个携纱器的运行轨迹。如果将本例中的30个携纱器的轨迹都描

绘出来,那么所有轨迹都会与实线和虚线的封闭多边形轨迹一致。按照 1.1 中所述的携纱器运行规律,每个携纱器沿着图 5 所示的封闭路径回到初始位置,共需 30 步,由于角轮转动的时序问题,携纱器的位置共改变 15 次。从携纱器移动路径的形状来看,六角形编织的路径和五月柱编织很相似,不同之处在于五月柱编织中为防止携纱器在交接时发生冲撞,所有的交接点中只有一半可以被携纱器占据,但对六角形编织而言,其所有的交接点(角轮翼缘)都可以被携纱器占据,因此在纱线交织密度上六角形编织是高于五月柱编织的。

在编织过程中,编织纱由携纱器带动在空间形成交织,形成编织预制件,同时牵伸(卷取)机构会将已经成形的编织预制件拉出成形面。经环氧树脂固化后的六角形编织预制件见图 6。如果将携纱器每一步的位置点相连接,便可以在空间中描绘出一条轨迹,这条轨迹基本可以代表纱线在空间中的走向,30 个携纱器的轨迹在 Matlab 软件中的组合见图 7,其俯视图所示的携纱器在底盘上的路径非常相似。显然,Matlab 软件中描绘出的纱线轨迹并不能真正代表预制件中纱线的轨迹,因为在预制件中纱线是被拉伸而彼此接触的,纱线的轨迹必然沿着最短的距离沿轴向贯穿编织预制件,而 Matlab 软件中的纱线轨迹由直线段连接而成,所以需要对这些纱线轨迹进行优化。



图 6 经环氧树脂固化的六角形编织预制件

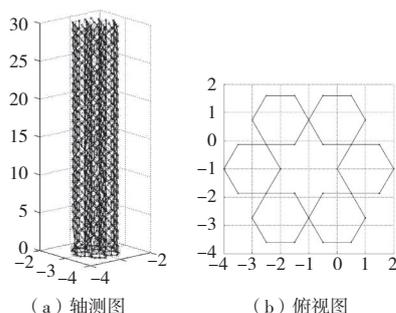


图 7 六角形编织物纱线的空间轨迹

2 三维打印辅助构建六角形编织结构

在 Matlab 软件中绘制的纱线轨迹只是大体上描述了纱线的空间走向,而六角形编织结构与传统编织结构的不同也决定了在建立几何结构时不可照搬传统编织结构。文献[5]研究了三维打印技术在机织和传统编织结构构建中的可行性和前景,参考其研究方法,可以利用三维打印技术辅助构建和优化六角形编织几何结构。

2.1 CAD 中模型的构建

为了对六角形编织物的几何结构进行打印,首先需要 CAD 软件中建立相应的三维模型。把六角形编织物的纱线空间坐标导入 CAD 软件,并利用 Spline 工具对生成的曲线进行优化,即可得到如图 8(a)所示的三维曲线模型。假设纱线截面为圆形,则可以把曲线模型中的每一条轨迹作为扫描路径,绘制每条曲线的扫描轮廓,于是就得到了图 8(b)所示的三维实体模型。显然,CAD 模型中的纱线轨迹比图 7(a)中 Matlab 软件绘制的轨迹要更平滑。图 8(b)中表面纱线有明显的弯曲,这与实际织物中纱线总是沿最短距离穿越的情况不相符,其原因是此模型是依据携纱器每一步的位置点相连接而绘出,虽然用 Spline 曲线进行了优化,但由于位置点的固定,故而出现了弯折的情况。为了观察内部纱线的走向与表面纱线的关联,使用三维打印机打印出模型。

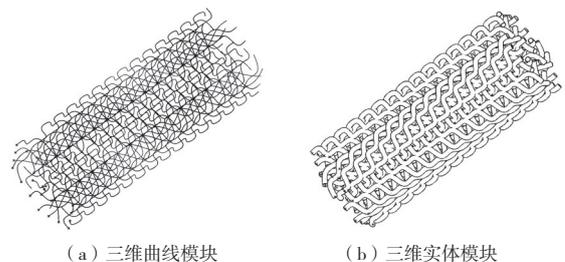


图 8 CAD 中绘制的六角形编织几何模型

2.2 三维模型的打印

三维模型的打印需要对 CAD 模型进行预处理。首先将 CAD 模型保存为“.stl”格式,再导入切片软件中生成 G 代码,在进行切片操作时,诸如层高、打印速度、填充率、支持材料等参数都会影响打印质量;将 G 代码导入三维打印机中,控制电动机带动喷头将融化了的丝材(fused filament)沉积在热床上得到三维模型。三维打印机的打印参数为:打印材料 ABS,喷头直径 400 μm ,层高 210 μm ,喷头温度 220 $^{\circ}\text{C}$,热床温度 90 $^{\circ}\text{C}$,打印速度 30 mm/s。由于三维打印机打印尺寸的限制,本例中仅打印了图 8(b)中 CAD 模型 1/3 的

高度,由于整个几何结构具有周期性和重复性,1/3高度的模型已经能够反映六角形编织结构中的纱线走向。本模型中纱线之间的间隙较大,需要加入支撑材料以使模型材料顺利地沉积,支撑材料在打印完成后会被全部去除。

三维打印机喷头的直径对打印模型的分辨率和保真度也有很大影响。打印模型的直径至少应为喷头直径的3倍,才能得到保真度较高的模型。本例中使用的三维打印机喷头直径为400 μm。此外,由于模型并非用于力学性能测试,因此模型填充率可以任意设置。

打印的六角形编织几何结构模型见图9。



图9 未优化的六角形三维打印几何模型

如图9所示,未优化的六角形三维打印几何模型外观形态与CAD模型是一致的。可以看到,模型中轴向和径向上纱线之间都存在较大的间隙,因此需要对此几何结构进行优化。

2.3 六角形编织结构优化

如图4中携纱器在底盘上的分布所示,角轮0-1翼缘上的6个携纱器为一组(标号为1、2、3、4、5、6),角轮1-1、1-2、1-3、1-4、1-5、1-6之间所夹的6个携纱器为一组(标号为1、2、3、4、5、6),在编织区域最边缘的18个携纱器为一组(标号为1'、2'、3'、4'、5'、6'、7'、8'、9'、10'、11'、12'、13'、14'、15'、16'、17'、18'),这3组携纱器分别排列成了正六边形。由Matlab模型和三维打印模型特征可知,每个携纱器在经过若干机器步后会回到初始位置,且沿z轴的空间轨迹具有相似性,仅在时序上有所不同。因此可以对原始的携纱器位置点进行坐标变换,以得到更加紧凑的,与实际编织物相符的几何模型。设携纱器位置点坐标为 (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) ,其中 $i=1, 2, 3, j=1, 2, 3, \dots, 10$ 。根据群空间理论,原有携纱器位置点坐标组成的平面点阵经过变换可以得到更加紧凑的几何模型,见式(1),变换矩阵为 W_i 。

$$\begin{bmatrix} X_{ij} \\ Y_{ij} \\ Z_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{i1} & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{i2} & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{i3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ij} \\ Y_{ij} \\ Z_{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

变换系数 $\rho_{i1}, \rho_{i2}, \rho_{i3}$ 与携纱器位置点坐标到中心轴的距离和编织物中纱线的阻塞状况有关,且 $\rho_{i1}, \rho_{i2}, \rho_{i3}$ 均小于1。

假设:所有纱线截面形状为圆形,且具有相同的线密度和纱线填充密度;编织过程中纱线的张力足够大,以使纱线在预制件中没有卷曲。

于是,考虑坐标平移的坐标变换便可由式(2)表达:

$$\begin{cases} x'_{ij} = \rho_{i1} \cdot \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2} \cdot \cos[\arctan(\frac{y_{ij}}{x_{ij}})] \\ y'_{ij} = \rho_{i2} \cdot \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2} \cdot \sin[\arctan(\frac{y_{ij}}{x_{ij}})] \\ z'_{ij} = \rho_{i3}z \end{cases} \quad (2)$$

如考虑坐标点的旋转,则式(2)可修正为式(3):

$$\begin{cases} x'_{ij} = \rho_{i1} \cdot \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2} \cdot \cos[\arctan(\frac{y_{ij}}{x_{ij}}) \pm \varphi_i] \\ y'_{ij} = \rho_{i2} \cdot \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2} \cdot \sin[\arctan(\frac{y_{ij}}{x_{ij}}) \pm \varphi_i] \\ z'_{ij} = \rho_{i3}z \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, $\arctan(\frac{y_{ij}}{x_{ij}}) \pm \varphi_i$ 的“+”代表绕z轴顺时针旋转,“-”代表绕z轴逆时针旋转。

将变换后的坐标点导入CAD软件,并用Spline曲线优化,便可得到如图10所示的几何结构实体模型。经树脂固化后的六角形编织预制件横截面见图10。

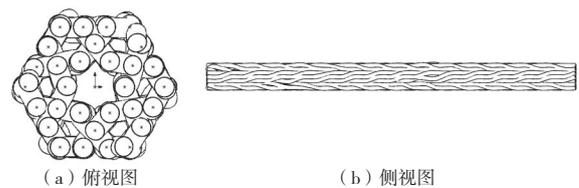


图10 优化后的几何结构实体模型

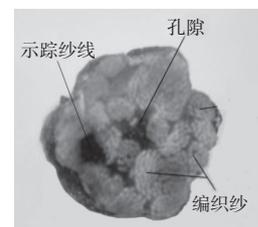


图11 经树脂固化后的六角形编织预制件横截面

图10(a)中优化后的几何结构截面视图中心有明显的孔隙,这与图11中六角形编织物截面中心出现的孔隙是一致的。在不考虑编织物中纱线受张力作用出现拉伸挤压的情况下,优化后的模型是比较接近预制件真实几何结构的。将优化后CAD模型生成G代码

后导入三维打印机,得到如图12所示的六角形三维打印几何模型。

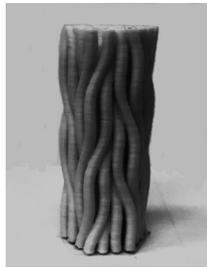


图12 优化后的六角形三维打印几何模型

2.4 六角形编织几何结构的划分

为了分析编织物的几何结构,一般会使用单胞体(unit cell)对编织物的微观结构进行定义。通常按照织物轴向由内到外把织物划分为内部单胞、表面单胞和角单胞,单胞体的形状多为正六面体^[5]。对于本例中的六角形编织物而言,由于其几何结构的对称性和重复性,可以依照图13(a)六边形虚线线框所示,用六边形棱柱来划分单胞体。于是有图13(b)和图13(c)所示的两种单胞体,每个单胞体中各有6根纱线段,纱线与z轴夹角 θ 为编织角。

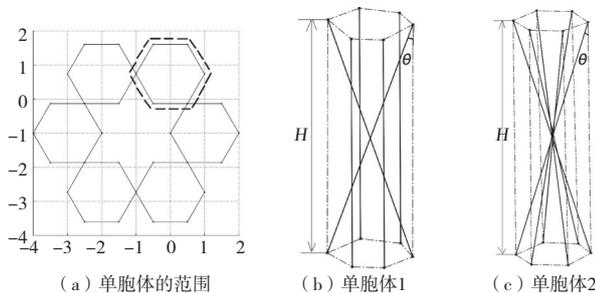


图13 六角形编织物中单胞体的划分

本例中的六角形编织物含30根编织纱,截面形状

为圆形,因此用六边形棱柱划分单胞体较为方便,如果利用六角形编织技术来织造其他截面形状的织物,是否适宜用六边形棱柱来划分单胞体仍需探讨。

3 结 语

本文探讨了三维打印技术辅助构建六角形编织物几何结构的可行性,通过坐标变换和三维打印的方法对一种编织物的几何结构进行了构建和优化。三维打印技术在模型成形方面的快速性和便捷性,为编织物几何模型的构建提供了一条新颖的路径。基于编织物单胞体理论,两种六边形棱柱的单胞体被定义,可以以此为基础分析预测六角形编织物的力学性能。今后亦可以利用三维打印的方法,对其他几何形状的六角形编织物的结构进行研究。



参考文献:

- [1] SCHREIBER F, THEELEN K, SCHULTE S. 3D-hexagonal braiding: possibilities in near-net shape preform production for lightweight and medical applications: 18th International Conference on Composite Materials [C]. Korea; 2011.
- [2] TSUZUKI M, KIMBARA M, FUKUTA K. Three-dimensional fabric woven by interlacing threads with rotor driven carriers: 5067525 [P]. 1991-11-26.
- [3] SCHREIBER F, KO F K, YANG H J, et al. Novel three-dimensional braiding approach and its products: 17th International Conference on Composite Materials [C]. Edinburgh; 2009.
- [4] QUAN Z, LARIMORE Z, WU A, et al. Microstructural design and additive manufacturing and characterization of 3D orthogonal short carbon fiber/acrylonitrile-butadiene-styrene preform and composite [J]. Composites Science and Technology, 2016(126): 139-148.
- [5] DU G W, KO F K. Unit cell geometry of 3-D braided structures [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1993, 12(7): 752-768.

(上接第42页)

化学聚合方法制备聚吡咯导电织物时,棉/氨、涤/氨平纹可以采用相同聚合工艺,所获得导电织物导电性能良好。

(2)经原位聚合法制备的聚吡咯导电织物的导电性能随着在大气环境中的暴露时间增加而线性下降,在大气环境中33 d后,其电阻增加约40%。

(3)经原位聚合法制备的聚吡咯导电织物的聚吡

咯与织物有着很好的附着强度,但洗涤过程中溶剂与聚吡咯的脱掺杂反应会造成织物电阻的增加。



参考文献:

- [1] 郑志然. 织物的电阻试验方法(AATCC 试验方法 76-1975) [J]. 山东纺织科技, 1978, 19(3): 49-50.
- [2] 薛晓康. 聚吡咯薄膜的电化学制备和性能研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [3] 李永舫. 导电聚吡咯的研究 [J]. 高分子通报, 2005(4): 51-57.

保 护 地 球 人 人 有 责