

DOI: 10.3901/JME.2020.17.182

# 碳纤维复合材料三维织造导向阵列变形研究\*

杜悟迪 刘 丰 单忠德 吴晓川 李思源

(机械科学研究总院集团有限公司先进成形技术与装备国家重点实验室 北京 100083)

**摘要:** 为实现三维结构复合材料的高质量成形,研究了复合材料柔性导向三维多针织造成形过程中导向阵列的变形特征。利用导向阵列边缘导向棒的中心距变化情况进行导向阵列变形特征研究,主要采用图像处理手段对中心距大小进行分析,从而获得不同织物高度条件下导向阵列中心距的变化特征,并对成形后复合材料预制体的成形精度和内部质量进行分析,建立了具有微变形的导向棒压实协调变形模型,探究导向阵列变形对预制体成形质量的影响。基于复合材料柔性导向三维多针织造成形工艺,导向阵列边缘导向棒中心距整体呈高斯分布,导向阵列变形的主要原因是导向棒自身的变形,且随织造过程进行,导向棒变形加剧。在进行导向棒选择和布置时,应选择初始变形小于 1.4 mm,变形区幅宽与变形区中心高度之比大于 0.845 的导向棒,有利于减小导向阵列变形情况,避免成形过程使导向棒进一步变形的可能。

**关键词:** 三维织造; 预制体; 导向阵列; 成形精度

**中图分类号:** TB332

## Study on Deformation of Three-dimensional Weaving Guide Array of Carbon Fiber Composites

DU Wudi LIU Feng SHAN Zhongde WU Xiaochuan LI Siyuan

(State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, China Academy of Machinery Science and Technology Group Co. Ltd, Beijing 100083)

**Abstract:** In order to realize the high-quality forming of three-dimensional composite materials, the deformation characteristics of the guide array in the forming process of flexible guiding three-dimensional multi-weaving of composite materials are studied by the center distance of the edge guide bars of the guide array. The variation of the center distance of the guide array of different height is obtained by using the image processing method. A compacted deformation model of the guide bar with micro-deformation was established. The forming accuracy and internal quality of the preform are analyzed to inquiry the influence of the deformation of the guided array on the forming quality of the preform. It is found that the preform formed by the flexible guide three-dimensional multi-weaving forming process has good dimensional accuracy and internal structure uniformity. The center distance of the guide array shows Gauss distribution. The main reason of the deformation of the guide array is the deformation of the guide bar which intensifies during the weaving process. When selecting and arranging the guide bar, the guide bars with the initial deformation of less than 1.4mm and the ratio of the width of the deformation area to the height of the deformation area from the base plate bigger than 0.845 should be selected. The chosen guide bars were beneficial to the deformation reducing of the guide array and avoid the possibility of further deformation of the guide bar during the forming process.

**Key words:** 3D woven; preform; guide array; forming precision

## 0 前言

三维结构复合材料由于在厚度方向引入了增强体,使其获得了抗分层、抗冲击、功能性强等特性,因此受到国内外学者的广泛关注<sup>[1-4]</sup>。目前,三维结构复合

材料预制体的织造方法主要有三维编织、三维机织、三维针织技术等<sup>[5-9]</sup>。利用现有三维结构复合材料织造方法已经实现了发动机喉衬、防热瓦、飞机刹车盘等结构件的成形织造,在航空航天、国防军工、舰船、汽车等领域有着广阔的应用前景<sup>[10-15]</sup>。

随着大型民航客机、大运载火箭技术的发展,三维结构复合材料的应用正在向尺寸大型化、结构复杂化、内在致密化方向发展。因此,对大型、复

\* 国家自然科学基金(51675213)和机械科学研究总院技术发展基金资助项目。20191109 收到初稿, 20200326 收到修改稿

杂结构三维复合材料构件的成形工艺提出了更高的要求。BILISIK<sup>[16]</sup>通过改变经纬纱细度研究了对于三维多轴向机织的碳纤维预制体尺寸的稳定性, 为三维多轴向织物的均匀化提供了依据。潘如如等<sup>[17]</sup>利用图像处理技术实现了对机织物的经纬纱密度的准确识别。李平礼等<sup>[18]</sup>针对三维单针织造工艺的变形行为、成形尺寸精度和防变形方法进行了研究, 能够有效减少变形, 提高织造层数。

复合材料预制体柔性导向三维多针织造方法, 纤维束以固定于导向模板上方的导向阵列作为节点进行多束逐层铺放, 铺放一定层数后进行压实致密化, 重复上述步骤, 最终形成三维结构预制体<sup>[19]</sup>, 成形原理如图 1 所示。其中, 导向阵列作为预制体形成的基本框架, 其结构稳定性与多束纤维同步铺放、致密化压实顺利实施都相关, 也直接决定了预制体的成形质量。所以, 研究复合材料预制体柔性导向三维多针织造过程中导向阵列变形的规律具有重要的研究意义。

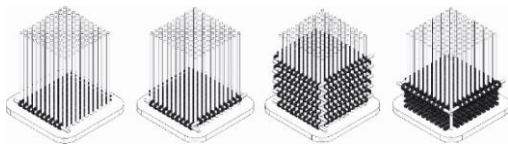


图 1 多针三维织造技术成形原理

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验方法

选选取截面为 243.6 mm×243.6 mm 正方形的预制体为试验对象, 根据预制体的尺寸和结构特征, 布置 102×102 的导向阵列, 导向棒选用 1.0 mm 直径的 304 不锈钢棒, 建立 2.4 mm 中心距的导向阵列, 布置方式如图 2 所示。

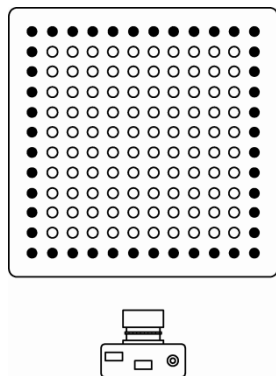


图 2 利用相机记录布置的导向阵列点阵边缘图像

X、Y 向的织造纤维均采用 101 根 T300-3K 的碳纤维进行织造, Z 向采用两股 T300-6K 碳纤维进

行导向棒替换。织造过程中, 每织造 10 层进行一次压实。压实完成后, 压实模板提升至织造层上方 150 mm 处, 以备进行下一阶段纤维束的铺放。纤维层经过压实后, 预制体结构基本稳定, 取纤维层上沿区域的导向阵列进行分析。利用 Canon EOS 6D 相机进行拍照, 记录导向阵列变形情况, 并采用图像处理技术对织造过程中导向阵列变形情况进行分析, 由于光线的影响剪掉导向阵列两侧各 5 根导向棒的图像, 最终取靠近中心区域的 92 根导向棒的位置情况进行导向阵列变形分析。

## 2 图像分析与变形表征

图 3 为预制体织造 100 层经过压实后的导向阵列图片。将已成形的织造纤维进行致密化压实后, 选取最上层织造纤维附近导向阵列区域(图 3 虚线框)进行导向阵列变形分析。

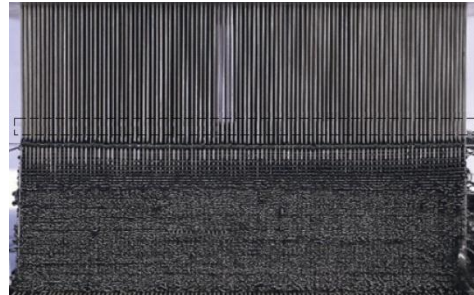


图 3 预制体织造 100 层经过压实后的导向阵列

将裁剪后的图片, 导入 Matlab 进行图像处理。对拍摄的图像进行灰度化, 反相, 基于 OSTU 大津法的二值化处理得到如图 4 所示的二值图片, 其中白色为间隙, 黑色为导向棒。



图 4 经过处理后的导向阵列二值图片

取图 4 所示的导向阵列图片的像素矩阵, 靠近织造层提取 10 行行矢量获得一个 10×2131 的矩阵

$$A = \begin{pmatrix} \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \end{pmatrix}$$

对  $A$  各列进行求和, 获得行矢量

$$a=(\cdots 10 \ 10 \ 10 \ 10 \ 4 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \cdots)$$

将  $a$  中大于等于 5 的置 1, 小于 5 的置 0, 得到二值行矢量

$$a_1=(\cdots 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \cdots)$$

提取行矢量  $a_1$  中连续为 0 的区域的中间坐标序号为导向棒的中心位置, 将中心位置的序列号依次赋给矢量  $b$ ,  $b$  作为记录导向棒中心位置的行矢量, 含有 92 个数据。由于导向阵列理论间距 2.4 mm, 可以根据 92 个中心位置像素差确定每个像素所代表的长度得到像素长度  $d_p$ , 由此可以通过相邻中心位置差值得到记录中心距  $d_i$

$$d_p = \frac{2.4(n-1)}{b_{92} - b_1} \quad (1)$$

$$d_i = d_p (b_{i+1} - b_i) \quad (2)$$

### 3 结果与讨论

导向阵列由细长钢棒密集排布而成, 织造纤维沿阵列间隙进行铺放, 并采用边棒约束织造纤维(如图 1), 边棒将织造纤维的张力转移到导向阵列边缘区域的导向棒上, 易造成边缘导向棒向阵列中心方向偏移, 随着织物高度的增加, 边缘导向棒的累积变形, 最终导致导向阵列边缘导向棒均向阵列中心偏聚, 织造纤维无法顺利进过阵列间隙进行铺放, 织造过程无法顺利进行。因此, 在三维多针织造成形过程中, 实时监测导向阵列边缘导向棒的中心距大小, 从而判断导向阵列变形情况。

#### 3.1 导向阵列边缘导向棒中心距变化特征

对阵列边缘导向棒进行图像采集, 并利用上述图像处理方法, 获得不同织造层数时边缘导向棒中心距的数值, 如图 5 所示。

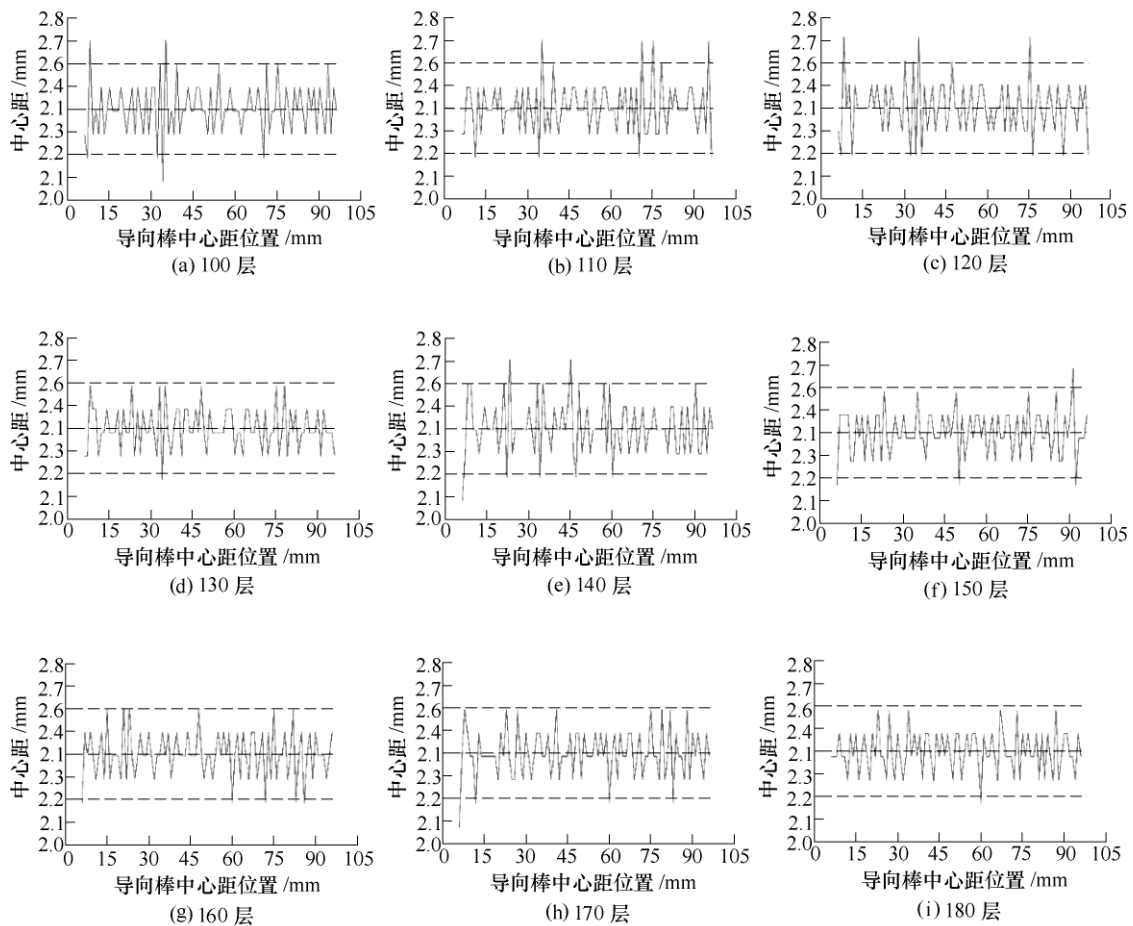


图5 不同织造层数时导向阵列中心距大小

由图 5 可知, 对于预制体不同织造层数对应的导向阵列, 其中心距的大小主要集中在 2.2~2.6 mm 之间, 仅有少数位置导向棒的中心距大小

产生较大变化, 将图 5 所示 100 层至 180 层条件下导向阵列中心距的大小进行分布统计, 结果如图 6 所示。

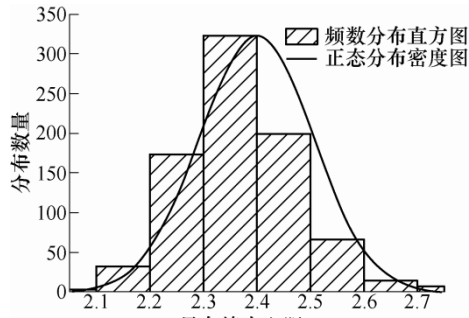


图 6 导向棒中心距概率分布情况

由图 6 可知, 导向棒中心距近似呈正态分布, 其概率密度函数为

$$y = 0.008\ 85 + 0.382\ 06 \exp \left( -0.5 \left( \frac{x - 2.358\ 82}{0.097\ 03} \right)^2 \right) \quad (3)$$

由概率密度函数可判断, 100 层至 180 层导向阵列中心距的波动主要为随机波动。由于导向棒与导向模板的尺寸设计, 导向阵列中心距在 2.2~2.6 mm 之间的波动主要由导向棒与导向模板的配合间隙导致。

### 3.2 织造完成后的预制体成形质量

基于图 5、6 所示的导向阵列中心距数值, 进一步考虑阵列中心距大小的变化对预制体成形质量的影响。织造完成后的预制体(图 7)进行高清 X 射线断层扫描, 结果如图 8 所示, 图中实线框为预制体的设计轮廓, 可知预制体成形截面与设计轮廓均符合较好。

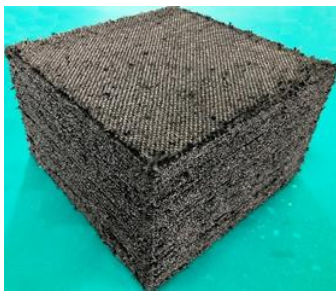


图 7 织造成形后预制体

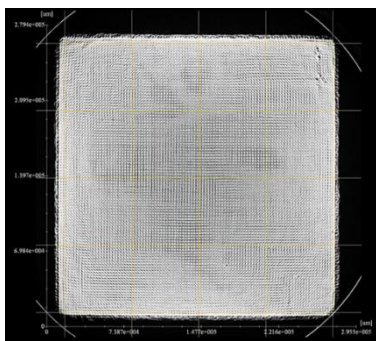


图 8 预制体截面轮廓与设计尺寸对比

导向阵列的变形主要对平面内的预制体截面尺寸产生影响, 成形截面设计为正方形, 因此使用 Image J 对预制体 X 射线断层扫描图平面内的两个方向进行成形尺寸的测量, 结果如图 9 所示, 可知两边长不同高度实测平均值与设计值的最大相对误差为 0.66%。导向阵列的变形控制较为合理, 预制体成形质量较好。

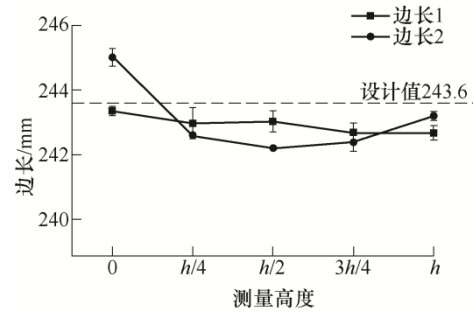


图 9 不同高度的预制体截面边长

### 3.3 导向阵列变形特征

三维多针织造成形方法可获得成形质量较好的预制体, 导向阵列中心距大小控制较稳定, 但是对于图 5、6 中导向阵列小于 2.2 mm 和大于 2.6 mm 的部分, 需要进一步讨论导向阵列变形的原因。

利用式 4 对 100~180 层预制体对应导向阵列中心距的数据进行处理, 获得导向阵列的变形量如图 10 所示。利用高分辨率 X 射线断层扫描手段进行预制体结构及内部纤维状态的分析, 提取预制体 100~180 层区域的 X 射线断层扫描图片, 如图 11 所示。

$$y = \begin{cases} x - 2.2 & x < 2.2 \\ 0 & 2.2 \leq x \leq 2.6 \\ x - 2.6 & x > 2.6 \end{cases} \quad (4)$$

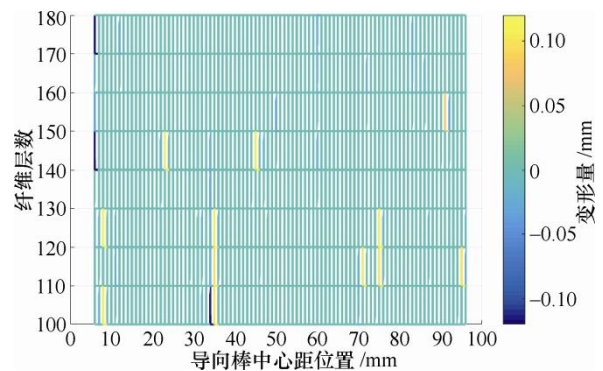


图 10 预制体 100~180 层导向阵列变形情况

由图 10 可知, 在 100~180 层共计 9 层、每层 101 根导向棒的变形量数据中, 有 50 个节点的中

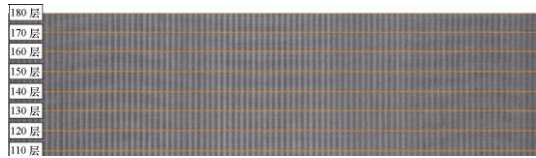


图11 预制体100~180层X射线断层扫描图

心距超出合理范围,占819个节点的6.1%,其中有4根导向棒的中心距在3个及以上织造层位置超出合理波动范围。由于导向棒属于大长径比的细长棒,因此其很容易受力弯曲,将导向棒中心距小于2.2 mm和大于2.6 mm的部分视为导向棒的变形导致。因此我们可以认为,这4根导向棒本身存在变形,占92根导向棒的4.3%。其余的超出合理范围的数据,我们认为由织造过程中织造针与导向棒之间产生的扰动,因此,根据图11所示的预制体断层扫描图可知,6.1%个节点出现的导向阵列变形未对预制体成形质量造成显著影响,预制体内部三向纤维结构较均匀。

为了进一步探讨织造工艺和导向棒自身变形对导向阵列的影响,采用同一批导向棒进行二次织造试验,同样对织造过程进行图像采集,并获得织造过程导向阵列中心距的变化情况,利用式(4)对导向阵列中心距大小处理,结果如图12所示。

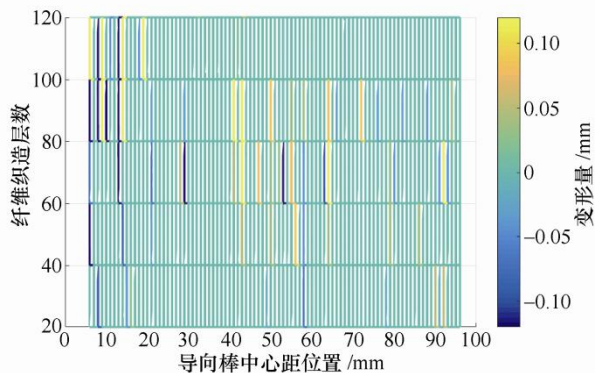


图12 二次织造预制体20~120层导向阵列变形情况

在二次织造试验过程中,20~120层导向棒中心距数据中有80个节点中心距数据超出合理范围,占546个导向棒的14.65%,其中出现3次及以上变形的导向棒增加至10根,占92根导向棒的10.87%。二次织造的20~120层导向棒中心距概率分布情况如图13所示,其导向棒中心距的概率分布密度函数为

$$f(x) = -0.0694 + 0.29455 \exp \left( -0.5 \left( \frac{x - 2.3931}{0.01436} \right)^2 \right) \quad (5)$$

其在区间[2.2,2.6]的置信度为0.805,与一次织

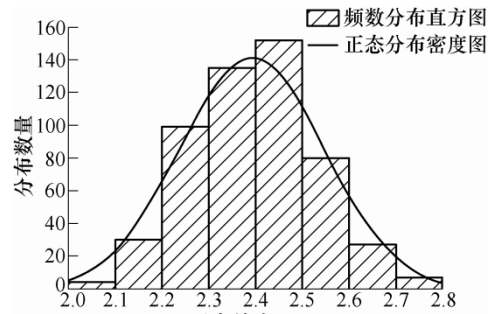


图13 二次织造导向棒中心距概率分布情况

造的的概率分布密度函数式3的在[2.2,2.6]的置信度为0.881对比。二次织造的置信度较低,即导向阵列有更高的概率出现变形,不利于三维多针织造成形的顺利实施。二次织造过程中有部分导向棒甚至出现不可逆的塑性变形,导向棒的失效导致导向阵列局部被破坏,织物在120层之后已无法继续织造,如图14所示。

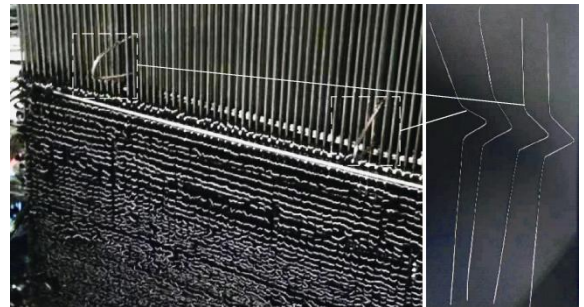


图14 二次织造导向棒压实工艺后产生的巨大变形

因此,认为由于导向棒的微小变形,导致在压实过程中,压实模板与变形的导向棒之间发生相互作用,促使导向棒变形增大,继而导致失效。为讨论导向棒本身变形对导向棒受压变形和压实工艺的影响,建立如图15所示的具有微变形的导向棒压实协调变形模型。

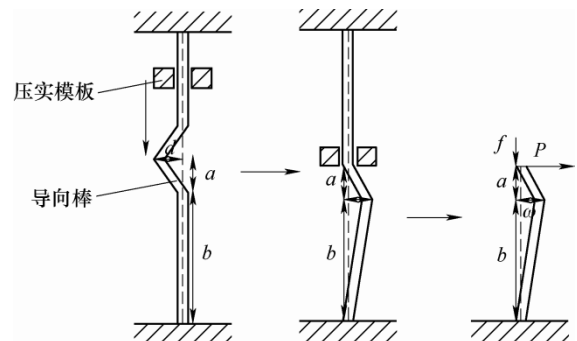


图15 具有微变形的导向棒压实协调变形模型

根据图15所示,导向棒的顶端和底端分别固支在顶板和底板上,压实模板沿导向棒向下运动,使已经具有变形的导向棒进行校直,由于校直过程

压实模板对导向棒有径向的压力作用, 导致新的变形。设导向棒存在初始变形量为  $d$  的变形, 变形区半幅宽度为  $a$ , 变形区距离底板的高度为  $b$ , 导向棒总长 500 mm。校直了变形区上段后, 下段受压实模板作用力  $P$  的作用产生变形量为  $\omega$  的变形, 导向棒受摩擦力  $f$  阻碍压实模板压实过程。

基于小变形假设, 采用分段刚化法计算得到摩擦力  $f$  与  $a$ 、 $b$ 、 $d$  的关系和变形量  $\omega$  与  $a$ 、 $b$ 、 $d$  的关系如下

$$f = \mu P = \frac{2\mu E I d}{\frac{a^3}{3} + \frac{b^3}{3} + a^2 b + a b^2} \quad (6)$$

$$\omega = \frac{d(3b^3 + 3ab^2)}{a^3 + b^3 + 3ab^2 + 3ba^2} \quad (7)$$

式中,  $E$  为材料的弹性模量,  $E=1.9 \times 10^{11}$  Pa;  $I=4.9 \times 10^{-14}$  m<sup>4</sup>; 导向棒直径  $d_a=1$  mm;  $\mu$  为压实模板与导向棒之间的摩擦因数, 取 0.4。

为满足小变形假设, 且压实过程产生的新变形不影响后续织造工艺的进行,  $a$ 、 $b$ 、 $d$  的取值要满足如下边界条件:  $d/a < 0.1$ 、 $d/b < 0.1$ 、 $a > 10d_a$ 、 $b > 10d_a$ 、 $2a+b < 500$  mm、 $d < 1.4$  mm, 则满足上述条件的参数  $a$ 、 $b$ 、 $d$  取值空间如图 16 所示。

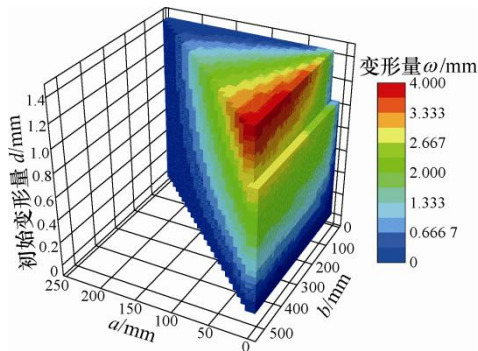


图 16 参数  $a$ 、 $b$ 、 $d$  的取值空间

根据图 16, 变形量  $\omega$  最大为 3.9 mm。由于相邻导向棒之间的中心距为 2.4 mm, 导向棒直径为 1 mm, 因此, 导向棒之间的间隙为 1.4 mm, 因此, 按照变形量  $\omega < 1.4$  mm 的原则对参数  $a$ 、 $b$ 、 $d$  的取值范围进行筛选, 即

$$\omega = \frac{d(3b^3 + 3ab^2)}{a^3 + b^3 + 3ab^2 + 3ba^2} < 1.4 \text{ mm} \quad (8)$$

按照式(8)对  $a$ 、 $b$ 、 $d$  的取值空间进行进一步的筛选, 结果如图 17 所示。

根据图 17, 当导向棒变形参数在图 17 取值空间内时, 最大摩擦力仅为 2.74 N, 摩擦力较小可以忽略不计, 可以仅考虑压实过程对  $\omega$  的影响。

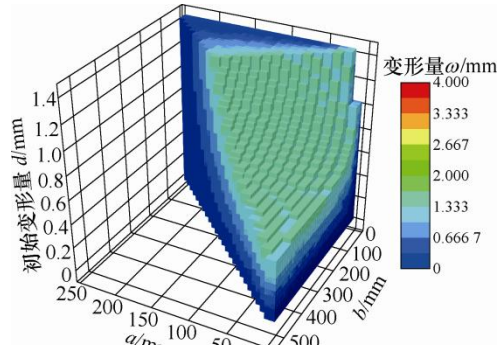


图 17  $\omega < 1.4$  mm 筛选后的参数  $a$ 、 $b$ 、 $d$  的取值空间

有微小变形的导向棒在压实过程中受到的影响可以使用  $\omega/d$  衡量,  $\omega/d$  与参数  $a$ 、 $b$  关系如下式

$$\frac{\omega}{d} = f\left(\frac{a}{b}\right) = \frac{3\frac{a}{b} + 3}{\frac{a^3}{b^3} + 3\frac{a^2}{b^2} + 3\frac{a}{b} + 1} \quad (9)$$

$f(a/b)$  在  $a/b > 0$  时单调递减, 其函数图像如图 18 所示。

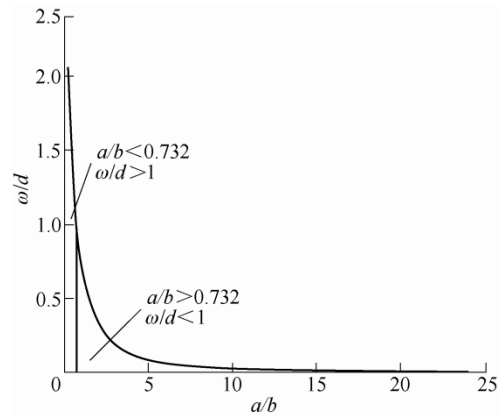


图 18  $\omega/d$  与  $a/b$  的关系

根据图 18 可知, 当  $a/b > 0.732$  时,  $\omega/d < 1$ 。即压实过程中, 当导向棒微小变形区的参数  $a/b > 0.732$ , 即变形区幅宽与变形区中心高度之比  $2a/(a+b)$  大于 0.845 的导向棒, 导向棒受压实作用下产生的变形  $\omega$  小于初始变形  $d$ , 使得压实过程中能够逐渐降低导向阵列的变形程度, 提高导向阵列稳定性, 有利于实现预制体的精确成形。

## 4 结论

基于复合材料柔性导向三维多针织造成形工艺, 织造完成的预制体成形尺寸精度保持较高, 预制体截面的两相邻边长的最大相对误差仅为 0.66%。织造过程中, 导向阵列的稳定性对织造工艺的顺利进行非常重要, 导向阵列中心距有一定随机波动, 其

主要是由于导向棒和导向模板的配合间隙导致。为减小这个随机波动,应当适当减小导向棒与中心距的配合间隙,在保证导向阵列顺利布置的同时,提高阵列稳定性。本文研究发现导向阵列变形产生的原因是导向棒本身的变形,变形的导向棒会使压实过程受到的摩擦阻力增大,并且压实工艺会对导向棒变形产生影响,因此导向棒的选择和布置对工艺的顺利进行非常关键。选取初始变形  $d < 1.4 \text{ mm}$ , 变形区幅宽与变形区中心高度之比  $2a/(a+b)$  大于 0.845 的导向棒,有利于减小导向阵列变形情况,可避免成形过程使导向棒进一步变形,有利于实现预制体的高效率、高精度成形。

### 参 考 文 献

- [1] 卢士艳, 聂建斌. 蜂窝状三维纺织复合材料的隔热性能研究[J]. 棉纺织技术, 2018, 46(12): 67-70.  
LU Shiyan, NIE Jianbin. Discussion of thermal insulation property of honeycomb three-dimensional textile composite material[J]. Cotton Textile Technology, 2018, 46(12): 67-70
- [2] 杨彩云, 胡振英. 三维机织 C/C 复合材料的摩擦磨损性能[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(1): 70-76.  
YANG Caiyun, HU Zhenying. Friction and wear properties of 3D woven reinforced C/C composites[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(1): 70-76.
- [3] 于姣. 三维编织复合材料冲击加载破坏裂纹演化过程[D]. 上海: 东华大学, 2018.  
YU Jiao. Damage crack development of 3-D braided composite under impact loading[D]. Shanghai: Donghua University, 2018
- [4] 宋云飞, 杜宇. 三维编织复合材料力学性能研究现状[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(10): 104-109.  
SONG Yunfei, DU Yu. Progressing in the research on mechanical properties of 3D braided composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(10): 104-109
- [5] 益小苏, 杜善义, 张立同. 复合材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.  
YI Xiaosu, DU Shanyi, ZHANG Litong. Composite materials manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [6] KHOKAR N. Noobing: A nonwoven 3D fabric-forming process explained[J]. Journal of the Textile Institute, 2002, 93(1): 52-74.
- [7] KHOKAR N. 3D fabric-forming processes: Distinguishing between 2D-weaving, 3D-weaving and an unspecified non-interlacing process[J]. Journal of the Textile Institute Proceedings & Abstracts, 1996, 87(1): 97-106.
- [8] 戎琦. 三维机织复合材料的织造技术[J]. 纤维复合材料, 2007(1): 31-33.  
RONG Qi. Weaving technology of 3D woven composites[J]. Fiber Composites, 2007(1): 31-33.
- [9] 王一博, 刘振国, 胡龙, 等. 三维编织复合材料研究现状及在航空航天中应用[J]. 航空制造技术, 2017(19): 78-85.  
WANG Yibo, LIU Zhenguo, HU Long, et al. Recent advancements of 3D braided composite and its applications in aerospace[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(19): 78-85.
- [10] BILISIK K. Three-dimensional braiding for composites: A review[J]. Textile Research Journal, 2013, 83(13): 1414-1436.
- [11] BOISSE P. Advances in composites manufacturing and process design[M]. Amsterdam: Elsevier, 2015.
- [12] CHEN X. Advances in 3D textiles[M]. Amsterdam: Elsevier, 2015.
- [13] 解惠贞, 崔红, 李瑞珍, 等. 战术导弹固体发动机喉衬材料的发展趋势[J]. 材料导报, 2015, 29(S1): 53-56.  
XIE Huizhen, CUI Hong, LI Ruizhen, et al. Development trend of throat material used in SRM of tactical missile[J]. Materials Reports, 2015, 29(S1): 53-56.
- [14] PICKETT A K, SIRTOUTAS J, ERBER A. Braiding simulation and prediction of mechanical properties[J]. Applied Composite Materials, 2009, 16(6): 345-364.
- [15] SHARP K, BOGDANOVICH A, BOYLE R, et al. Wind blade joints based on non-crimp 3D orthogonal woven Pi shaped preforms[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2013, 49(3): 9-17.
- [16] BILISIK K. Dimensional stability of multiaxis 3D-woven carbon preforms[J]. Journal of the Textile Institute, 2010, 101(5): 380-388.
- [17] 潘如如. 基于数字图像处理的机织物结构参数识别[D]. 无锡: 江南大学, 2010.  
PAN Ruru. Autotomatic recognition of woven fabric parameters based on digital image analysis[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010.
- [18] 李平礼, 单忠德, 战丽, 等. 复合材料柔性导向三维织造防变形方法[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(4): 64-68.

- LI Pingli , SHAN Zhongde , ZHAN Li , et al. Deformation preventing method of flexible oriented 3D composite woven process[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(4): 64-68.
- [19] 单忠德, 刘丰. 复合材料预制体数字化三维织造成形[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- SHAN Zhongde, LIU Feng. Digital 3D-weaving forming process for composite performs[M]. Beijing : China Machine Press, 2019.
- 
- 作者简介: 杜悟迪, 男, 1994 年出生。主要研究方向为先进成形技术及装备。  
E-mail: cnduwudi@qq.com
- 刘丰(通信作者), 男, 1979 年出生, 博士, 研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为先进成形技术及装备  
E-mail: liufengcam@126.com