

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.07.011

不同导向结构材料对复合材料柔性导向三维织造层厚的影响

侯卓健, 刘丰, 单忠德, 杜悟迪, 陈哲

(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: 针对复合材料柔性导向三维织造成形的发展要求, 提出了一种使用预复合树脂碳纤维束作为柔性导向结构材料的三维织造工艺方法。研究了金属棒、碳纤维棒、预复合树脂碳纤维束三种不同导向结构材料对柔性导向三维织造层厚的影响规律。通过分析建立的导向结构变形与摩擦阻力的计算模型, 发现在导向结构相同变形量下, 柔性树脂碳纤维束摩擦阻力远小于金属棒。与金属棒和碳纤维棒相比, 预张紧的柔性树脂碳纤维束导向阵列在压实过程中更加致密、均匀, 压实效果更好。对预制体进行 CT 扫描, 发现树脂碳纤维束导向结构预制体内部结构均匀, 树脂碳纤维柔性导向结构可以节省替纱环节, 更易实现三维织造压实过程中纤维层的均匀致密。

关键词: 三维织造; 预制体; 柔性导向; 复合材料

中图分类号: TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)07-0060-05

Effect of Different Guide Structure Materials on Thickness of Flexible Guided 3D Weaving Layer of Composites

Hou Zhuojian, Liu Feng, Shan Zhongde, Du Wudi, Chen Zhe

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

Abstract : Aiming at the development requirements of flexible guiding three-dimensional weaving of composite materials, a three-dimensional weaving process using carbon fiber bundles of pre-composite resin as flexible guiding structural materials was proposed. The effects of three different guiding structural materials of metal rod, carbon fiber rod and pre-composite resin carbon fiber bundle on the thickness of flexible guided three-dimensional weaving layer were studied. The calculated model analysis of the deformation of the guiding structure and the frictional resistance shows that the frictional resistance of the flexible resin carbon fiber bundle is much smaller than that of the metal rod under the same deformation of the guiding structure. Compared with metal rods and carbon fiber rods, the pre-tensioned flexible resin carbon fiber bundle guiding array is denser and more uniform during compaction, and the compaction effect is better. Through CT scanning of the preform, it is found that the internal structure of the resin carbon fiber bundle guiding structure prefabricated body is uniform, resin carbon fiber flexible guiding structure can save the yarn replacement, and it is easier to achieve uniform and dense fiber layer in the three-dimensional weaving compaction process.

Keywords : three-dimensional weaving ; preform ; flexible guidance ; composite material

碳纤维复合材料拥有质轻、比强度高、抗疲劳、耐腐蚀等优异性能, 且具有良好可设计性, 在航空航天、汽车等领域的应用范围不断扩大^[1]。三维复合材料构件因其优越的层间结合性能和整体力学性能是未来复合材料发展趋势之一。目前三维复合材料预制体制造方法主要有三维机织、细编穿刺、软硬混编轴棒法、径棒法、柔性导向三维织造方法等^[2-10]。

对于大型厚实三维预制体, 柔性导向三维织造方法具有更大的加工柔性, 其原理是对预制体三维结构进行 CAD 模型分层, 然后根据预制体形状特点和轮廓信息预置 z 向导向阵列, 携纱器携带纤维束以导向模板上的导向棒为节点逐层织造成形^[11-12]。

在复合材料柔性导向三维织造成形过程中, 压实工艺决定着预制体的层密度与纤维体积分数, 对预制

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51675213)

通讯作者: 单忠德, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为先进制造技术与装备 E-mail : shanzd@cam.com.cn

刘丰, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为先进制造技术与装备 E-mail : liufengcam@126.com

收稿日期: 2019-04-16

引用格式: 侯卓健, 刘丰, 单忠德, 等. 不同导向结构材料对复合材料柔性导向三维织造层厚的影响 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(7) : 60-64.

Hou Zhuojian, Liu Feng, Shan Zhongde, et al. Effect of different guide structure materials on thickness of flexible guided 3D weaving layer of composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(7) : 60-64.

体的织造质量有极大影响。胡培利等^[13]对整个预制体压实过程进行分析,发现分为三个不同阶段。刘云志等^[14]建立预制体模型,揭示纤维K数、导向结构中心距与纤维体积分数的关系。李平礼等^[15]采用分段式织造和防变形处理有效减少导向结构的变形。笔者主要探究导向结构材料对预制体压实过程的影响。

复合材料柔性导向三维织造成形主要选用碳棒或者钢针等细长导向棒形成导向阵列,以保持织造的三维预制体几何形状,将 x/y 向纱线轮流铺放在导向阵列中并在铺放一定层数后用多孔压实板压实,在预制体织造完成后再通过替纱环节将导向棒替换成碳纤维束,形成全三维纤维束预制体。为进一步提高成形质量与效率,采用预复合树脂碳纤维束组成 z 向导向阵列,直接织造成三维复合材料预制体,节省了替纱环节,如图1所示。预复合树脂碳纤维束柔性导向阵列上端固定,下端施加载荷进行张紧,以保持纤维束导向阵列几何形状。 x/y 向纤维铺放后采用边棒锁紧,为了避免边棒对柔性导向束的影响,边棒搭接在外侧刚性导向柱上。

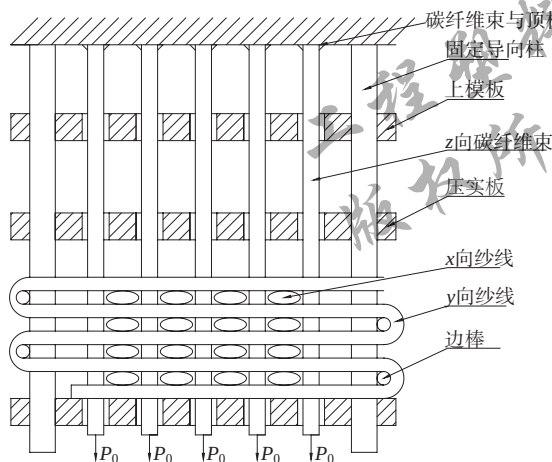


图1 预复合树脂碳纤维束导向三维织造法

1 实验部分

1.1 主要原料

热塑性聚氨酯: 670as-2, 上海联景高分子材料有限公司;

z 向碳纤维: T700-12K, 东丽株式会社;

x/y 向碳纤维: T300-3K, 东丽株式会社;

金属棒: 直径1 mm, 长200 mm, 兴化市银龙不锈钢制品有限公司;

碳纤维棒: 直径1.2 mm, 长200 mm, 东莞市索奥复合材料制品有限公司。

1.2 主要仪器与设备

织造平台: 可织造空间 50 mm × 50 mm × 160

mm, z 向导向阵列为19根 × 19根, 导向阵列中心距为2.4 mm, 自制;

电子尺: KTM-250型, 深圳鸿镁科技有限公司;

采集卡: YAVUSB8ADPRO采集卡, 武汉亚为电子科技有限公司;

校准量块: 10, 20, 40 mm, 西南工具厂;

X射线三维显微镜: nanoVoxel2000型, 天津三英精密仪器有限公司。

1.3 工艺实验设计

在织造前用校准量块校正电子尺的高度测量系统, 结果表明重复定位精度在0.1 mm左右, 在静止时测量值跳动不超过0.01 mm。

预复合树脂碳纤维束通过熔融涂覆法制备, 其中碳纤维束采用T700-12K碳纤维, 表面涂覆670as-2热塑性聚氨酯。

分别采用金属棒、碳纤维棒以及预复合树脂碳纤维束形成导向阵列, 进行三维预制体织造成形, 研究不同导向阵列对预制体织造成形过程中层间压实以及三维预制体织造质量的影响规律。采用金属棒作为导向结构的预制体, x/y 向织造完成后用12K碳纤维束替换金属棒; 用碳纤维棒作为导向结构的预制体, x/y 向织造完成后截断多余的碳纤维棒。预制体纤维结构如图2所示。

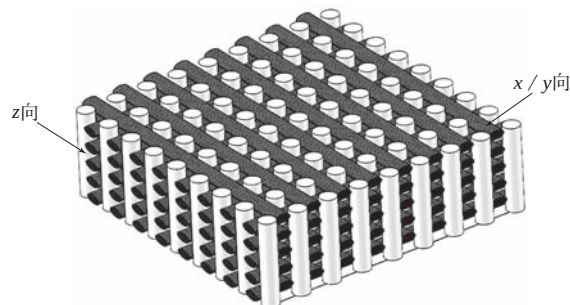


图2 预制体纤维结构

为避免采用其它动力源带来的振动误差或其它系统误差, 压实过程采用重力载荷压实的方式。 x/y 方向一个织造循环为1层, 织造5层后先由质量3.6 kg的多孔压实板通过导向阵列对织造的预制体进行预压实, 当预制体稳定后再将20 kg的砝码施加在压实板上, 从而达到压实的目的。

1.4 性能测试

压实高度测试: 采用电子尺对预制体压实高度进行记录。

内部结构扫描测试: 采用X射线三维显微镜扫描预制体, 检查其内部织造质量。

2 结果与讨论

2.1 不同导向结构材料下的三维织造压实层厚研究

压实是复合材料柔性导向三维织造过程中重要的一道工序,直接影响着预制体的层密度与纤维体积分数。预压实是为了让织造的 x/y 向纤维束进行初步的平整,避免产生纤维层的翘曲和层间间隙。预压实不附加重力载荷,仅以压实板自身的重力进行压实。预压实结果如图 3 所示。

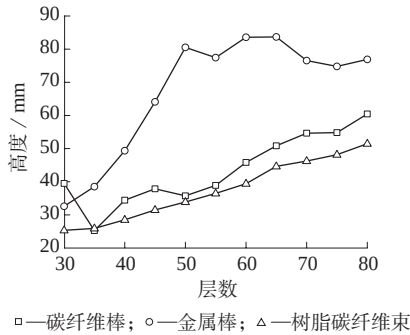


图 3 不同导向材料下的预压实高度随织造层数的变化情况

由图 3 可看出,采用金属棒导向阵列的三维织造预制体预压实高度随层数变化增长较快,50 层后在 80 mm 处出现了振荡情况。金属棒导向阵列两端由孔板固定,可织造空间总高 160 mm,所以在中心高度 80 mm 处易产生较大变形。当预压实的力不足以克服因导向阵列变形产生的对压实板的摩擦力以及纤维层受压产生的变形抗力时,预压实的预制体织造层高度会在一定高度范围内振荡。总体上采用碳纤维棒导向阵列比金属棒导向阵列预压实高度更低,稳定性也有一定提升,织造压实过程中变形较小。采用树脂碳纤维束柔性导向阵列预压实高度比基于碳纤维棒和金属棒的预压实高度相对较低,且均匀性好。这是由于树脂碳纤维束导向阵列具有柔性,可以实现一定微小变形调整,使多孔压实板顺利通过导向阵列。

为了实现预制体的致密化,在每次进行预压实后加载 20 kg 砝码进行终压实。压实结果如图 4 所示。图 4 中直线为三种导向材料压实高度与层数关系的拟合直线,由此得到的拟合方程如表 1 所示。由图 4 及表 1 可知预制体终压实高度与织造层数基本成线性关系。从拟合结果来看碳纤维棒和树脂碳纤维束导向阵列较为稳定,基本均匀分布在拟合直线附近。与金属棒导向阵列和碳纤维棒导向阵列相比,树脂碳纤维束导向阵列预制体的高度数据与拟合直线的相关系数更接近 1,预制体的均匀性最好。碳纤维束导向阵列预制体的拟合直线斜率小,说明

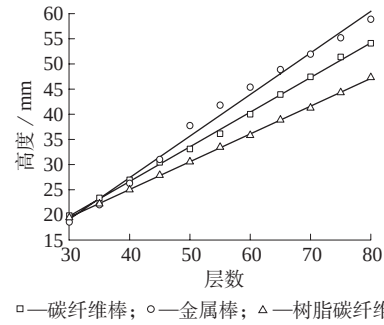


图 4 终压实预制体高度随织造层数变化情况及拟合直线

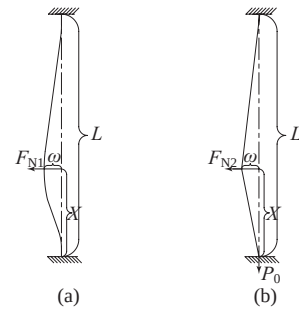
表 1 不同导向材料下终压实预制体高度拟合结果

导向材料	拟合方程	相关系数
碳纤维棒	$y=0.688\ 56x-0.898\ 27$	0.999 32
金属棒	$y=0.826\ 76x-5.681\ 09$	0.995 14
树脂碳纤维束	$y=0.552\ 13x+2.958\ 45$	0.999 85

碳纤维束导向阵列预制体的压实效果好。

2.2 不同导向结构材料压实摩擦阻力分析

复合材料柔性导向三维织造压实过程中由于所使用的导向结构材料不同,所以压实过程中导向材料微变形导致的导向结构与压实板孔之间产生的摩擦阻力也不同。金属棒和碳纤维棒作为导向结构可以简化为两端固定的细长杆,在距离底板高度 X 处由于受到压实板作用产生一微小挠曲变形 ω ,设刚性导向棒在 X 高度受压实板孔作用产生侧向压力为 F_{N1} ,如图 5a 所示。



a—金属棒、碳纤维棒; b—树脂碳纤维束

图 5 金属棒、碳纤维棒和树脂碳纤维束模型受力情况

根据材料力学计算公式可得式 (1):

$$F_{N1} = \frac{3E_1\pi d^4 L^3 \omega}{64X^3(L-X)^3} \quad (1)$$

根据摩擦力公式可得式 (2):

$$F_1 = \mu_1 F_{N1} \quad (2)$$

其中金属棒的材料为 304 不锈钢棒,其弹性模量 $E_1=1.9 \times 10^{11}$ Pa; 钢棒的直径 $d=1.0$ mm,导向阵列的高度 $L=160$ mm,304 不锈钢棒的摩擦系数 $\mu_1=0.1$,则摩擦阻力 F_1 与微变形量 ω 和高度 X (即侧向力施加位置) 的关系如图 6 所示。由图 6 可以看出,摩擦阻力和微变形量线性正相关,而沿高度对

称分布,在中点高度附近,微变形量作用相对较小,导向变形产生的摩擦阻力相对较小,而越接近上下边缘高度,微变形量作用越明显,变形越大产生的摩擦阻力越大,因此要尽量减小在上下固定板附近的导向结构变形。

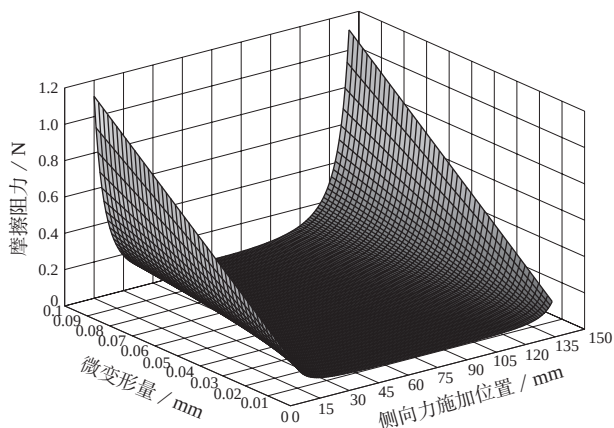


图6 金属棒的摩擦阻力与微变形量和侧向力施加位置的关系

预复合树脂碳纤维束则可简化为无弹性绳,一端固定,另一端施加 P_0 预紧力,在距离底板高度 X 处由于受到压实板作用产生一横向位移 ω ,设柔性导向束在 X 高度受压实板孔作用产生侧向压力为 F_{N2} ,如图 5b 所示。

根据材料力学计算公式可得式 (3):

$$F_{N2} = \frac{P_0 \omega}{X} \cdot \left(1 + \frac{\sqrt{X^2 - \omega^2}}{\sqrt{(L-X)^2 - \omega^2}} \right) \quad (3)$$

根据摩擦力公式可得式 (4):

$$F_2 = \mu_2 F_{N2} \quad (4)$$

其中导向阵列总长 $L=160$ mm,摩擦阻力的作用点高度为 X ,预紧力 $P_0=1.4$ N,预复合树脂碳纤维束的摩擦系数 $\mu_2=0.3$,则柔性导向摩擦阻力 F_2 与微变形量 ω 和高度 X (即侧向力施加位置)的关系如图 7 所示。由图 7 可以看出,摩擦阻力和微变形量线性相关,而沿高度先减小再增加,在中点高度附近较小。与金属棒导向阵列相似,越接近上下边缘高度,微变形量作用越明显,变形越大产生的摩擦阻力越大,因此要尽量减小在上下固定板附近的导向结构变形。

图 8 示出微变形量为 0.01 mm 时侧向力施加位置对两种导向结构摩擦阻力的影响。由图 8 可以看出,在相同微小变形情况下树脂碳纤维束的摩擦阻力远小于金属棒的摩擦阻力。在微变形量 0.1 mm,侧向力施加位置 15 mm 处,金属棒最大摩擦阻力为 0.1112 N,而预复合树脂碳纤维束摩擦阻力仅为 0.0031 N。所以树脂碳纤维束导向阵列压

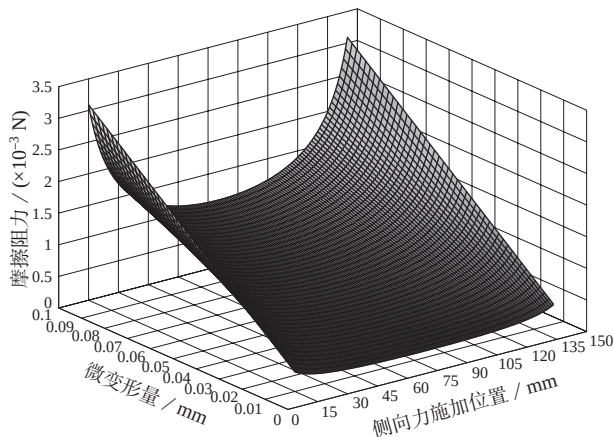


图7 树脂碳纤维束的摩擦阻力与微变形量和侧向力施加位置的关系

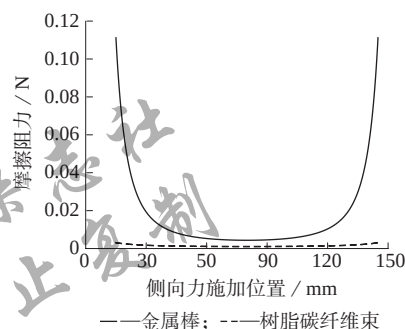
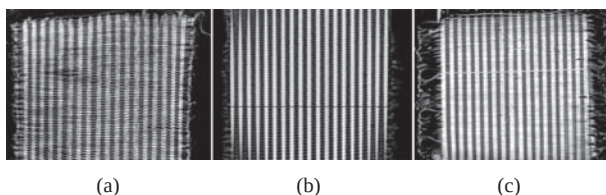


图8 侧向力施加位置对两种导向结构摩擦阻力的影响

实过程高度与层厚关系的拟合直线斜率最小,压实效果最好。

2.3 预制体 CT 扫描检测分析

三种织造方法成形的复合材料预制体 CT 扫描结果如图 9 所示。由图 9 可以看出,采用树脂碳纤维束柔性导向三维织造的预制体纱线整体笔直,无弯曲现象,没有发现 x/y 向纱线偏移的情况,纱线分布整体均匀,达到了较好的织造效果,与未替纱的碳纤维棒导向阵列预制体织造质量相当。金属棒导向阵列替纱后的预制体纤维束存在一定的扭曲现象,在内部出现了一些孔洞缺陷。这可能是替纱过程中替纱针偏离导向结构所留出的空间,刺入 x/y 向纱线,从而扰动、拉扯了 x/y 向纱线,造成了一定的 x/y 向纱线偏离和错位。



a—金属棒导向阵列; b—碳纤维棒导向阵列;
c—树脂碳纤维束导向阵列

图9 三种预制体 CT 三维扫描图

3 结论

(1) 与金属棒、碳纤维棒等刚性导向阵列相比,预复合树脂碳纤维束柔性导向阵列在复合材料三维织造压实过程中层厚的均匀性和致密度更好,终压实条件下,压实高度和层厚关系线性度高。

(2) 通过对建立的金属棒挠度变形摩擦阻力计算模型和树脂碳纤维束微变形摩擦阻力计算模型进行比较,发现在相同的微变形情况下,柔性导向结构的摩擦阻力比刚性导向结构的更小。

(3) CT扫描结果显示,树脂碳纤维束作为导向结构的三维预制体内部结构均匀,导向束整体笔直,缺陷较少。与金属棒、碳纤维棒等刚性导向结构相比,预复合树脂碳纤维束作为导向结构在三维织造压实过程中更容易实现纤维层均匀致密。

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.
Du Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1):1-12.
- [2] 郭洪伟, 张立泉, 朱梦蝶, 等. 高性能复合材料用机织 2.5D 织物的结构设计及织造工艺[J]. 玻璃纤维, 2017(3):1-5.
Guo Hongwei, Zhang Liquan, Zhu Mengdie, et al. Structural design and weaving process of 2.5D woven fabrics used for high performance composites[J]. Fiber Glass, 2017(3):1-5.
- [3] 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 Ya'nan, et al. Review of 3D woven preforms for the composite blades of aero engine[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(4):748-759.
- [4] 魏连锋, 崔红, 嵇琳, 等. 预制体结构对三维编织 C/C 复合材料本征性能影响研究[J]. 炭素, 2017(1):5-9.
Wei Lianfeng, Cui Hong, Ji A'lin, et al. Effects of preform structure on mechanical properties of three-dimensional braided carbon/carbon composites[J]. Carbon, 2017(1):5-9.
- [5] Krenkel W, Heidenreich B, Renz R. C/C-SiC composites for advanced friction systems[J]. Advanced Engineering Materials, 2009, 4(7):427-436.
- [6] Taverna A R, Thompson W S. Erosion-resistant nosetip construction:US4515847[P]. 1985-05-07.
- [7] 乔永乐, 徐惠娟, 沈薇, 等. 准三维针刺碳/碳复合材料几何构型对压缩试验性能的影响研究[J]. 工程与试验, 2017, 57(2):56-58.
Qiao Yongle, Xu Huijuan, Shen Wei, et al. Study on effects of geometry configuration of quasi-3D needle-punched C/C composites on compression property[J]. Engineering & Test, 2017, 57(2):56-58.
- [8] 张波, 贺平照, 肖春, 等. 径棒法编织 C/C 复合材料高温拉伸性能研究[J]. 材料导报, 2017, 31(S1):351-354.
Zhang Bo, He Pingzhao, Xiao Chun, et al. Tensile behavior of C/C composites woven with radial carbon rods under high test temperature[J]. Materials Review, 2017, 31(S1):351-354.
- [9] 朱昭君, 强洪夫. 基于均匀化理论的 4D 轴编 C/C 复合材料的细观力学性能预测[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(1):92-97, 104.
Zhu Zhaojun, Qiang Hongfu. Forecast research on micromechanical properties of 4D in-plane C/C composites based on homogenization theory[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2019, 42(1):92-97, 104.
- [10] 孙一凡, 李勇, 还大军, 等. Z-pin 增强复合材料开孔层合板压缩性能[J]. 航空动力学报, 2019, 34(4):885-893.
Sun Yifan, Li Yong, Huan Dajun, et al. Compression performance of open-hole composite laminates reinforced by Z-pin[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(4):885-893.
- [11] Shan Zhongde, Liu Feng, Qiao Juanjuan, et al. 3D weaving forming technology and equipment for composites[C]//International conference on advanced technology of design & manufacture (ATDM 2011). London:IET, 2011:87-90.
- [12] Shan Zhongde, Liu Feng, Dong Xiaoli, et al. Three-dimensional weave-forming method for composites:US8600541B2[P]. 2013-12-03.
- [13] 胡培利, 单忠德, 刘云志, 等. 复合材料构件预制体压实致密工艺研究[J/OL]. 机械工程学报, 2018:1-7[2019-04-24]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/11.2187.TH.20180903.1608.030.html>.
Hu Peili, Shan Zhongde, Liu Yunzhi, et al. Compaction and densification process of composite component preforms[J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 2018:1-7[2019-04-24]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/11.2187.TH.20180903.1608.030.html>.
- [14] 刘云志, 单忠德, 战丽, 等. 柔性导向三维正交结构复合材料预制体建模研究[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(6):63-66, 83.
Liu Yunzhi, Shan Zhongde, Zhan Li, et al. Research on modeling of 3D orthogonal flexible weavon composite preform[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(6):63-66, 83.
- [15] 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.