

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.05.013

径棒法三维预制体建模及结构参数的影响

杨宁, 刘丰, 杜悟迪, 吴晓川, 明禹, 王驰腾, 胡培利

(中国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: 与常规三维编织、三维机织等预制体单元结构具有重复性不同, 径棒法碳/碳复合材料预制体单元结构随预制体径向厚度改变而改变, 导致预制体纤维体积含量预测以及与预制体结构调控相关的成形参数设计困难。为解决如上问题, 建立了径棒法碳/碳复合材料预制体单元结构数学模型以及预制体纤维体积含量预测算法。通过编织预制体试验样件与数学模型预测值进行对比, 外形尺寸基本一致, 预制体层数与预测值一致, 预制体纤维体积分数与模型预测结果的相对误差为3.10%, 验证了已建立的数学模型的正确性以及纤维体积含量算法的准确性。通过已建立的数学模型分别探究了在相同尺寸条件下导向棒轴向中心距、导向棒周向夹角角度两个结构参数对于预制体成形层数、纤维体积分数的影响规律, 并选取了典型结构参数进行了预制体试验样件制备, 其中, 预制体层数、外形尺寸实际与预测结果一致, 纤维体积分数实际值与预测值相对误差不超过5.05%, 进一步对数学模型以及对结构参数影响规律的预测进行了有效验证。

关键词: 径棒法编织; 复合材料预制体; 单元数学模型; 结构参数; 纤维体积含量

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)05-0095-07

Modeling of radial carbon rods weaving 3D preforms and influence of structural parameters

YANG Ning, LIU Feng, DU Wudi, WU Xiaochuan, MING Yu, WANG Chiteng, HU Peili

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

Abstract : Unlike the unit cell structure of conventional 3D braid, 3D woven, and other preform components, the unit cell structure of carbon/carbon composite preforms fabricated by the radial carbon rods weave method changes with the radial thickness of the preform. This leads to difficulties in predicting the fiber volume fraction of the preform and in designing the forming process parameters related to preform structural control. To address the above issues, a mathematical model for the unit cell structure of carbon/carbon composite preforms produced by the radial carbon rods weave method, and algorithm for predicting the fiber volume fraction of the preform have been established. By comparing the test samples of woven preforms with the predicted values from the mathematical model, it was found that the outer dimensions were generally consistent, the number of preform layers matched the predicted values, and the relative error between the fiber volume fraction of the preform and the model's predicted results was 3.10%, verifying the correctness of the established mathematical model and the accuracy of the fiber volume content algorithm. Using the established mathematical model, the influence of two structural parameters—the axial center distance of the guide rods and the circumferential angle between the guide rods—on the formation of preform layers and fiber volume content was investigated under identical dimensional conditions. Typical structural parameters were selected to fabricate preform test samples, in which the number of preform layers and outer dimensions matched the predicted results, and the relative error between the actual and predicted fiber volume fractions did not exceed 5.05%. This further validated the mathematical model and the prediction of the influence laws of structural parameters.

Keywords : radial carbon rods weaving ; composite preform ; unit cell mathematical model ; structural parameters ; fiber volume fraction

通信作者: 刘丰, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为先进成形技术及装备

收稿日期: 2025-03-10

引用格式: 杨宁, 刘丰, 杜悟迪, 等. 径棒法三维预制体建模及结构参数的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(5): 95–101.

YANG Ning, LIU Feng, DU Wudi, et al. Modeling of radial carbon rods weaving 3D preforms and influence of structural parameters[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(5): 95–101.

先进复合材料以其比模量高、比强度高、抗冲击性能好等优势被广泛应用于航空航天、兵器工业、交通运输等领域^[1-4]。相较于二维层合板结构复合材料,三维结构复合材料拥有更好的抗冲击、抗层间剪切性能,常见的三维结构复合材料预制体成形方法有三维编织技术、三维机织技术、柔性导向三维织造技术等^[5-6]。其中预制体作为增强相是复合材料结构中的主要承载部分,预制体的纤维体积含量作为影响复合材料构件的热、力学性能的关键因素,也是预制体成形过程中的重要指标之一。刘云志等^[7]根据三向正交结构复合材料预制体工艺的重复性的特点,提出了基于柔性导向三维织造工艺的预制体单胞模型,并推导出预制体整体纤维体积含量的计算方法。李春晖等^[8]通过建立三维织造复合材料预制体的四边形和三角形预制体的细观结构,并将预制体划分为内胞、边胞、角胞等形式,并对预制体纤维体积含量进行预测并验证。师有玲等^[9]以三维织造为研究对象,建立三维织造复合材料预制体细观结构模型,推导预制体纤维体积含量与细观模型结构参数之间的关系,研究了导向套直径、导向套中心距等结构参数对纤维体积含量的影响。对于回转体预制体成形,国内外学者进行了相关研究,荆云娟等^[10]建立了三维正交机织圆管织物单胞模型,并利用几何模型公式建立了织造工艺参数与几何结构特征参数之间的理论关系。李典森等^[11]基于三维圆型编织的主要工艺,系统研究了三维五向圆型编织的纱线交织结构,建立了内部单胞和表面单胞模型,推导了单胞的几何特性、编织工艺参数之间的数学关系。张志钢等^[12]建立了基于减纱工艺三维六向变截面锥管状预制体的单胞分区域几何模型,从而进行预制体的几何尺寸和纤维体积含量的计算。陈利等^[13]研究了三维四向圆型编织物的细观结构,建立了表面单胞和四个内部单胞。Wang等^[14]分析了圆形编织预制体的单胞模型。软硬混编成形是将纤维刚性棒与纤维按照一定形式排布的具有三维结构的复合材料预制体成形方法,包括轴棒法、径棒法、细边穿刺等。曹翠微等^[15]提出了一种三维四向编织的轴棒法编织方法,并对碳化处理后的样件进行了力学性能测试。梅宝龙等^[16]构建了一种碳/碳软硬混编的三维四向单胞模型,揭示了压实力对预制体孔隙率的影响关系。笔者对于具有三维回转结构的径棒法成形预制体展开细观

单胞模型的研究,相较于单胞结构一致的三维编织、机织等预制体构件,径棒法复合材料预制体单胞结构参数随预制体径向厚度改变而改变,导致其预制体纤维体积含量预测困难,以及与预制体结构调控相关的成形工艺设计参数设计困难。笔者通过提出了一种预制体单胞结构数学模型以及预制体纤维体积含量的预测算法,揭示了结构参数对于预制体结构的影响规律,为径棒法碳/碳复合材料预制体的设计提供了理论基础。

1 径棒法碳/碳复合材料预制体单胞数学模型及纤维体积分数计算方法

1.1 预制体单胞结构尺寸计算方法

采用碳纤维刚性棒和碳纤维纱线软硬混编成形径棒法碳/碳复合材料预制体,预制体及其单胞结构模型如图1所示。

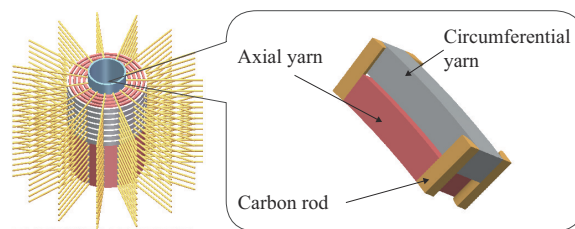


图1 径棒法编织碳/碳复合材料预制体

Fig. 1 Radial carbon rods weaving carbon/carbon composite preform

如图2所示结构为径棒法预制体单胞组织结构,其中 l_a 为单胞导向棒轴向中心距, t 为单胞模型厚度。与常见的三维编织、机织预制体织物单胞结构整体一致不同,径棒法碳/碳复合材料预制体由于导向棒周向夹角固定,随着预制体厚度的增加,单胞的结构参数也随之改变,单胞的弧长逐渐增大,导致在纤维束截面积相同的情况下,单胞模型轴向纱线的厚度逐渐减小。

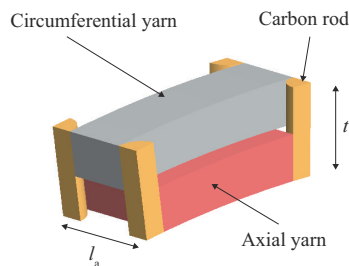


图2 单胞结构模型

Fig. 2 Unit cell structure model

先根据轴向纱的截面积与如图3所示的黑框区域面积相等求出轴向纱纤维的厚度 t_A ,其中, O_2 为芯模的圆心,以 O_2 为圆心分别以半径 R 和 $R+t$ 为半径

作圆弧交到导向棒内线,由图3可以看出,此时红色部分并不是规则扇形,由于导向棒自身体积的原因,故导向棒内直线交与点 O_1 。红色区域的为轴向纤维束在单胞结构中的纱线堆积面积 S_c ,由弓形 S_1 加上等腰梯形 S_2 再减去弓形 S_3 可得,见式(1)。

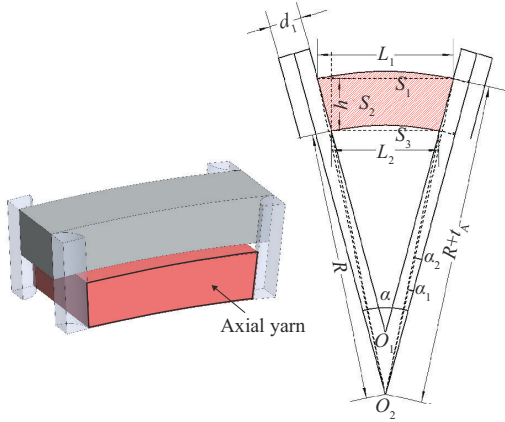


图3 单胞结构轴向纱截面示意图

Fig. 3 Diagram of axial yarn cross-section of unit cell structure

$$S_c = S_1 + S_2 - S_3 \quad (1)$$

根据图3中三角形几何关系可以得出 α_1 和 α_2 ,见式(2)~式(3)。

$$\alpha_1 = \sin^{-1} \frac{\frac{1}{2}d_1}{R + t_A} \quad (2)$$

$$\alpha_2 = \sin^{-1} \frac{\frac{1}{2}d_1}{R} \quad (3)$$

根据图3中角度关系,可以得出以为圆心 O_2 的弦长 L_1 和 L_2 ,表达式见式(4)~式(5)。

$$L_1 = 2(R + t_A) \sin \frac{\alpha - 2\alpha_1}{2} \quad (4)$$

$$L_2 = 2R \sin \frac{\alpha - 2\alpha_2}{2} \quad (5)$$

再由三角形几何关系得出 S_2 梯形面积的高 h ,式(6)。

$$h = \frac{\frac{1}{2}(L_1 - L_2)}{\tan \frac{\alpha}{2}} \quad (6)$$

最终,可计算弓形面积 S_1, S_3 以及梯形面积 S_2 ,其中各自表达式见式(7)~式(9)。

$$S_1 = \frac{1}{2}(R + t_A)^2[(\alpha - 2\alpha_1) - \sin(\alpha - 2\alpha_1)] \quad (7)$$

$$S_2 = \frac{1}{2}(L_1 + L_2)h \quad (8)$$

$$S_3 = \frac{1}{2}R^2[(\alpha - 2\alpha_2) - \sin(\alpha - 2\alpha_2)] \quad (9)$$

单束纤维的截面积 S_c 的计算公式见式(10)。

$$S_c = \frac{n\pi d^2}{4\varepsilon} \quad (10)$$

式中: n 为单束纱线中的纤维丝数; d 为纤维丝直径; ε 为纤维堆积密度。

联立式(1)~式(10)可得到单胞轴向纱的厚度 t_A 的精确解析表达式,但结果较为复杂,不适宜计算,故将其转化为以 O_1 为圆心的扇形面积,如图4所示,具体的计算方法如下所示,其中 m 代表单胞所在层数, m 取值为 $0, 1, 2, \dots$

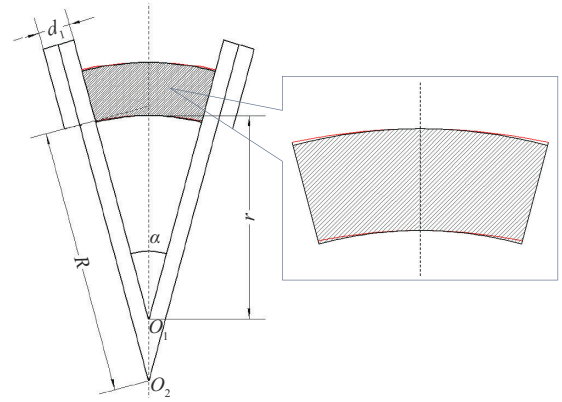


图4 轴向纱线截面示意图

Fig. 4 Diagram of the axial yarn cross-section

以 O_1 为圆心的扇形半径 r_m 的计算公式见式(11)。

$$r_m = R_m - \left(\frac{R_m}{\cos \frac{\alpha}{2}} - \frac{R_m \tan \frac{\alpha}{2} - \frac{d_1}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} \right) \quad (11)$$

扇形面积即轴向纱线的截面积 S_c 见式(12)。

$$S_c = \frac{\alpha}{360^\circ} \pi \left[(r_m + t_{Am+1})^2 - r_m^2 \right] \quad (12)$$

由式(12)可以推导出轴向纱单胞厚度 t_{Am+1} ,见式(13)。

$$t_{Am+1} = \sqrt{\frac{S_c \times 360^\circ}{\pi \alpha} + r_m^2} - r_m \quad (13)$$

由此可得单胞结构轴向纱线的纤维体积 V_{Am+1} ,见式(14)。

$$V_{Am+1} = \frac{\alpha}{360^\circ} \pi l_a \left[(r_m + t_{Am+1})^2 - r_m^2 \right] \quad (14)$$

式中: α 为导向棒周向夹角角度; l_a 为导向棒轴向中心距。

单胞结构中周向纱线模型如图5所示,根据黑色矩形区域面积等于纤维束截面积可求出单胞结构中周向纱线的厚度 t_c ,由于预制体导向棒轴向中

心距 l_a 不变,单胞结构中周向纱的厚度 t_c 恒为定值,与层数无关。

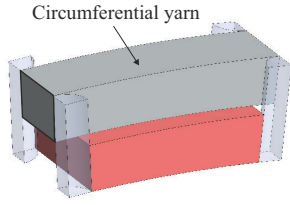


图5 周向纱模型示意图

Fig. 5 Diagram of circumferential yarn model

周向纱单胞模型中厚度 t_c 计算公式见式(15)。

$$t_{Cm+1} = \frac{S_C}{l_a - d_1} \quad (15)$$

由此可得单胞结构周向纱线的纤维体积 V_{Cm+1} ,见式(16)。

$$V_{Cm+1} = \frac{\alpha}{360^\circ} \pi (l_a - d_1) \times \left[(R_m + t_{Am+1} + t_{Cm+1})^2 - (R_m + t_{Am+1})^2 \right] \quad (16)$$

其中,不同层数 m 之间的 r 与 R 关系见式(17)~式(18)。

$$r_{m+1} = r_m + t_{Am+1} + t_{Cm+1} \quad (17)$$

$$R_{m+1} = R_m + t_{Am+1} + t_{Cm+1} \quad (18)$$

单胞结构的厚度 t_m 为轴向纱厚度 t_{Am} 与周向纱厚度 t_{Cm} 的和,见式(19)。

$$t_{m+1} = t_{Am+1} + t_{Cm+1} \quad (19)$$

碳棒中纤维体积 V_R 计算方法见式(20)。

$$V_R = \frac{n \times \pi \times d^2}{4} \times t_{m+1} \quad (20)$$

单胞内的总纤维的体积 V_{cell} 见式(21)。

$$V_{cellm+1} = (V_{Am+1} + V_{Cm+1}) \times \varepsilon + V_R \quad (21)$$

1.2 预制体纤维体积含量预测算法

根据每层的单胞内的纤维含量,再由每一层的单胞数量,确定每一层的纤维含量,再逐层将纤维含量进行累加,如式(22)所示,最终得到整个预制体纤维体积含量 V_σ 见式(22)。

$$V_\sigma = \sum_{i=0}^m V_{cell,i+1} \times \frac{360^\circ}{\alpha} \times f \quad (22)$$

式中: f 为预制体轴向层数。

预制体体积分数 V_{fr} 的计算公式见式(23)。

$$V_{fr} = \frac{V_\sigma}{\pi h (R_{m+1}^2 - R_0^2)} = \frac{\sum_{i=0}^m [(V_{Am+1} + V_{Cm+1}) \varepsilon + V_R] \frac{360^\circ}{\alpha} f}{\pi h (R_{m+1}^2 - R_0^2)} \quad (23)$$

式中: h 为预制体高度。

2 结构参数试验验证与分析

为验证径棒法碳/碳复合材料预制体的单胞数学模型以及预制体纤维含量算法的准确性,选用实际预制体为例,其中:轴向和周向碳纤维规格均为T700-12K,纤维丝直径为 $7 \mu\text{m}$;碳纤维刚性棒直径 1 mm ,长度为 50 mm ,内置纤维规格为12K,导向棒周向夹角为 9° ,导向棒轴向中心距为 2.4 mm ,轴向层数为15层;芯模材料为丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS),质量为 31 g ,芯模外径 30 mm ;设计预制体外径尺寸为 70 mm 。

2.1 径棒法预制体成形纤维束填充因子

由于纤维纱线束是由一定数量的纤维丝组成的,纱线的填充因子 ε 决定着纱线中的纤维体积分数,而填充因子 ε 的大小取决于纤维丝的排列堆积方式,如图6a,当纱线呈现普通堆积形式时, $\varepsilon < 0.785$;如图6b,当纱线为密排四方堆积形式时, $\varepsilon = 0.785$;当纱线为图6c为密排六方堆积形式时, $\varepsilon = 0.9069$ 。

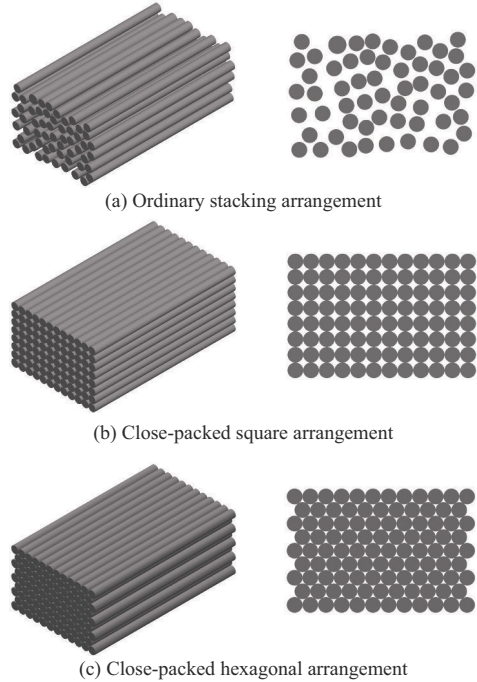


图6 单束纤维堆积方式示意图

Fig. 6 Illustration of single-fiber stacking arrangements

为更清晰地了解此成形工艺预制体内部的纤维丝束纱线堆积情况,采用电子计算机断层扫描技术对预制体进行成像分析,其中CT实验参数为:曝光时间为 0.7 s ,加速电压为 200 kV ,电流为 $350 \mu\text{A}$,像素尺寸为 $52.45 \mu\text{m} \times 52.45 \mu\text{m}$,得到内部结构如图7、图8所示,截取轴向纱截面积 S 平均值为 0.6647 mm^2 ,

周向纱截面面积 S 平均值为 0.6817 mm^2 ,由式(24)计算出预制体实际的综合填充因子 ε 为0.686。

$$\varepsilon = \frac{n\pi d^2}{4S} \quad (24)$$

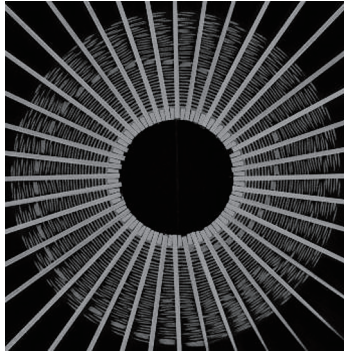


图7 预制体结构CT俯视图(轴向纱截面)

Fig. 7 CT top view of preform structure (axial yarn cross-section)

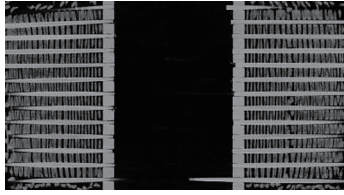


图8 预制体结构CT正视图(周向纱截面)

Fig. 8 CT front view of preform structure (circumferential yarn cross-section)

2.2 基础参数试验样件验证

将以上设计参数带入预制体数学模型中,得到预制体结构参数预测值,预测值与实际值的预制体结构参数见表1,试验样件实体如图9所示。

表1 预制体预测值和实际测量值对照表

Tab. 1 Comparison table of predicted and actual measured values of preform

Preform parameters	Outer diameter/mm	Inner diameter/mm	Axial height/mm	Number of layers
Predicted value	70.812	30	36	28
Actual value	70.192	30	38	28

将成形工艺参数和预制体结构参数带入到预制体纤维体积含量预测算法当中,得到预制体的体积分数为48.11%,再用称重法对实际预制体的体积分数进行计算,实际值为49.65%,预测值与实际值的相对误差为3.10%,其中周向纱层数预测值和实际值一致,验证了预制体数学模型的正确性及准确性。

2.3 导向棒轴向中心距对预制体整体结构的影响以及数学模型的验证

导向棒轴向中心距作为基础结构参数,直接影

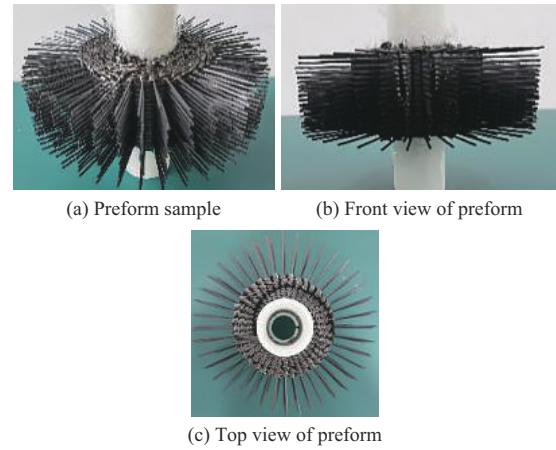


图9 径棒法编织预制体实物图

Fig. 9 Physical image of radial carbon rod weaving preform

响周向纱的纤维束铺层厚度,进一步影响预制体整体尺寸、层数以及纤维体积含量,通过改变导向棒轴向中心距从2.4 mm至3.0 mm,碳纤维规格为T700-12K,碳纤维丝直径为 $7\text{ }\mu\text{m}$,轴向层数为15层,碳棒直径1 mm,导向棒夹角 9° ,预制体外径70 mm,进行预测计算。

图10为导向棒轴向中心距与预制体层数、纤维体积含量关系。由图10可知,随着导向棒轴向中心距的增大,在外形尺寸不变的情况下,预制体的周向纱层数增多,纤维体积含量随之提高;单层周向纱的厚度随着导向棒轴向中心距的增大而降低,导致预制体层数增加。

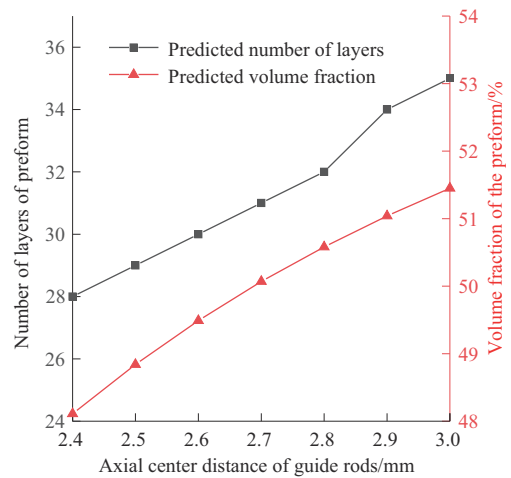


图10 导向棒轴向中心距与预制体层数、纤维体积含量关系

Fig. 10 Relationship between axial center distance of guide rods and circumferential layer count and fiber volume fraction of preform

为验证数学模型的准确性,选取轴向中心距为3.0 mm进行试验样件编织,并记录逐层数据。如图11所示,选取预制体试验样件的外形半径尺寸与预测值基本一致,预制体层数预测值与实际值相同,

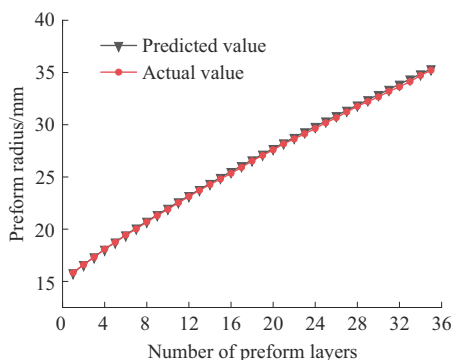


图11 预制体层数和半径的关系

Fig. 11 Relationship between number of preform layers and radius

试验样件的体积分数预测值为52.41%,实际测量值为52.15%,相对误差为0.50%,进一步验证了单胞模型以及纤维含量算法的正确性及准确性。

为探究导向棒周向夹角角度对预制体成形质量的影响,以导向棒轴向中心距2.4 mm,碳纤维规格为T700-12K,碳纤维丝直径为7 μm ,轴向层数为15层,碳棒直径1 mm,预制体外径70 mm,导向棒周向夹角分别从6°,9°,12°,15°,18°带入数学模型进行计算,预制体周向纱层数及纤维体积含量与导向棒周向夹角角度之间的关系如图12所示,在外形尺寸一致的情况下,预制体层数随着导向棒周向夹角的增大而增多,而纤维体积含量随着导向棒夹角的增大呈现先上升后下降的趋势,其中在9°的时候纤维体积含量最高。

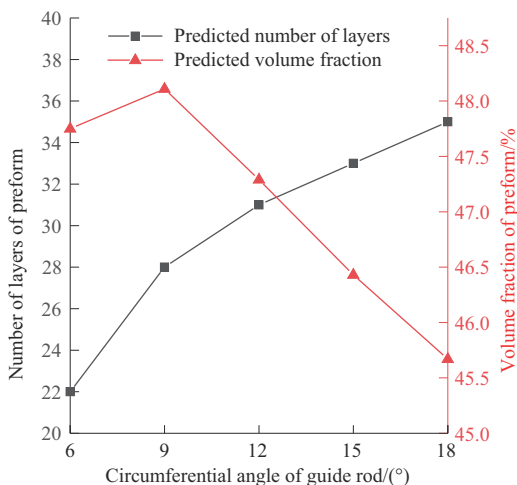


图12 预制体导向棒周向夹角角度与预制体层数及体积分数的关系

Fig. 12 Relationship between circumferential angle of guide rods in preform and number of layers and volume fraction of preform

选取导向棒周向夹角角度为15°的试验样件进行验证,外形等尺寸参数不变,实际值与预测值结果如图13所示。预制体外形尺寸以及层数的实际

测量值与预测值基本一致,纤维体积含量预测值为46.78%,实际测量值为44.53%,相对误差为5.05%,进一步验证了单胞模型以及纤维含量算法的正确性及准确性。

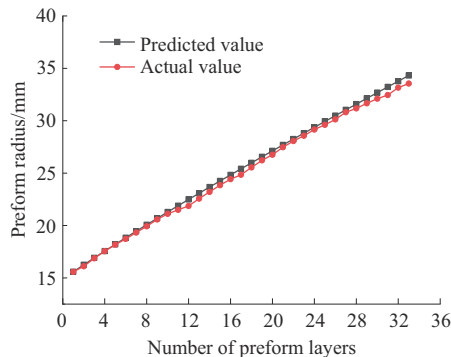


图13 预制体层数和半径的关系

Fig. 13 Relationship between number of preform layers and radius

3 结论

(1)建立了径棒法碳/碳复合材料预制体单胞结构数学模型以及预制体纤维体积含量预测算法,并选取不同结构参数典型样件对数学模型进行验证,其中半径尺寸和层数基本一致,纤维体积分数最大相对误差不超过5.05%,验证了预制体单胞数学模型的准确性。

(2)通过数学模型分别探究了在相同尺寸条件下,导向棒轴向中心距、导向棒周向夹角角度两个结构参数对于预制体成形层数、纤维体积含量的影响规律预测及分析,并选取了典型参数制备了典型样件进行了有效验证。

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] WEI X Y, XIONG J, WANG J, et al. New advances in fiber-reinforced composite honeycomb materials[J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63(8): 1 348-1 370.
- [3] 益小苏, 张明, 安学锋, 等. 先进航空树脂基复合材料研究与应用进展[J]. 工程塑料应用, 2009, 37(10): 72-76.
YI Xiaosu, ZHANG Ming, AN Xuefeng, et al. Development and application of advanced aeronautical polymer matrix composites [J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(10): 72-76.
- [4] 单忠德, 周征西, 孙正, 等. 航空航天先进复合材料三维预制体成形技术与装备研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(20): 64-79.
SHAN Zhongde, ZHOU Zhengxi, SUN Zheng, et al. Research of 3D advanced aerospace composite preforms forming technology and equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59

- (20):64–79.
- [5] SHAN Z, CHEN S, ZHANG Q, et al. Three-dimensional woven forming technology and equipment[J]. *Journal of Composite Materials*, 2016, 50(12):1 587–1 594.
- [6] 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, 60(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, 60(19):78–85.
- [7] 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.
- [8] 李春晖, 贺磊, 王正方, 等. 三维织造复合材料预制体纤维体积分量的预测及实验验证[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(4):35–40.
- LI Chunhui, HE Lei, WANG Zhengfang, et al. Prediction and experimental verification of three-dimensional woven composite preform fiber volume fraction[J]. *Composites Science and Engineering*, 2021(4):35–40.
- [9] 师有玲, 单忠德, 刘丰, 等. 三维织造复合材料微观模型[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(8):2 621–2 628.
- SHI Youling, SHAN Zhongde, LIU Feng, et al. 3D weaving composites microstructure model[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(8):2 621–2 628.
- [10] 荆云娟, 陈利, 王海涛, 等. 三维正交机织圆管织物的试织及其单胞模型[J]. *棉纺织技术*, 2016, 44(6):23–27.
- JING Yunjuan, CHEN Li, WANG Haitao, et al. Weaving of three-dimensional orthogonal woven tubular fabric and its unit cell model[J]. *Cotton Textile Technology*, 2016, 44(6):23–27.
- [11] 李典森, 卢子兴, 陈利, 等. 三维五向圆型编织复合材料微观分析及弹性性能预测[J]. *航空学报*, 2007, 28(1):123–129.
- LI Diansen, LU Zixing, CHEN Li, et al. Microstructure analysis and prediction of the elastic properties of 3D and 5-D tubular braided composites[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, 28(1):123–129.
- [12] 张志钢, 蒋云, 李静东. 三维六向变截面锥管状预制体结构建模及性能预测[J]. *固体火箭技术*, 2018, 41(3):369–375, 387.
- ZHANG Zhigang, JIANG Yun, LI Jingdong. Structural modeling and performance prediction of 3D 6-directional variable-section taper prefab[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2018, 41(3):369–375, 387.
- [13] 陈利, 李嘉禄, 李学明. 三维四步法圆型编织结构分析[J]. *复合材料学报*, 2003, 20(2):76–80.
- CHEN Li, LI Jialu, LI Xueming. Analysis of 4-step 3D tubular braiding structures[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2003, 20(2):76–80.
- [14] WANG Y Q, WANG A S D. On the topological yarn structure of 3D rectangular and tubular braided preforms[J]. *Composites Science and Technology*, 1994, 51(4):575–586.
- [15] 曹翠微, 李贺军, 李照谦, 等. 一种三维四向碳/碳复合材料的微观结构与力学性能[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 34(5):713–716.
- CAO Cuiwei, LI Hejun, LI Zhaoqian, et al. Microstructures and mechanical properties of 3D 4-directional carbon/carbon composite[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science)*, 2010, 34(5):713–716.
- [16] 梅宝龙, 董九志, 任洪庆, 等. 基于多维度建模的碳/碳软硬混编预制体孔隙分析与单胞模型[J]. *纺织学报*, 2023, 44(9):108–115.
- MEI Baolong, DONG Jiuzhi, REN Hongqing, et al. Unit modeling and pore analysis of C/C soft-hard blended preform based on multi-dimensional modeling[J]. *Journal of Textile Research*, 2023, 44(9):108–115.

(上接第 84 页)

- [18] WANG X Q, LI S P, PENG L M. A structural curve with reduced stress concentration and its elastic - plastic failure analysis[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 162. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107925.
- [19] DANTAS R, GOUVEIA M, SILVA F G A, et al. Notch effect in very high-cycle fatigue behaviour of a structural steel[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 177. DOI: 10.7520/1001-4888-16-144.
- [20] LYONS J S, LIU J, SUTTON M A. High-temperature deformation measurements using digital-image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 1996, 36(1):64–70.
- [21] 朱飞鹏, 龚琰, 白鹏翔, 等. 基于二维DIC的脆性材料拉伸应力-应变曲线测定[J]. *实验力学*, 2018, 33(3):333–342.
- ZHU Feipeng, GONG Yan, BAI Pengxiang, et al. Determination of tensile stress-strain curve of brittle materials based on two-dimensional digital image correlation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(3):333–342.
- [22] Budynas R, Keithnisbett J. Shigley's mechanical engineering design[M]. McGraw Hill: New York, 2016.