

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.09.015

2.5D 立体织物渗透率的多尺度仿真技术预测

朱立平^{1,2}, 冯京¹, 金子程¹, 杨成¹, 高维成²

(1. 南京玻璃纤维研究设计院有限公司, 南京 210012; 2. 哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 现有的预测立体织物渗透率方法无法全面考虑织物内部复杂的微观结构和流体动力学行为, 难以实现从微观到宏观的多尺度分析。提出了一种新的多尺度仿真模型, 能够从纤维束到单胞再到平板织物层面, 全面模拟追踪立体织物的渗透过程, 进而揭示立体织物内部微观结构对渗透性能的影响机制。模型通过从纤维束到单胞结构再到平板织物各尺度的各向渗透率 K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 的传递, 实现由纤维束到单胞再到平板织物三个尺度的数据及模拟传递, 从而实现多尺度仿真。同时, 将实验测量的渗透率值与模型计算值对照获得修正系数, 进一步提高模型预测的准确性。采用本模型, 开展了织物结构参数对渗透率的影响规律探究。结果表明, 增加经纱、纬纱股数和经密、纬密均能增加织物纤维体积分数。纬纱方向渗透率始终是最高的, 而经纱方向的渗透率则始终是最低的。经密、纬密的增加导致纬纱、经纱和单胞厚度三个方向渗透率的下降, 纬纱股数的增加导致经纱方向渗透率的下降和纬纱方向渗透率的上升, 经纱股数的增加导致经纱方向渗透率的上升和纬纱方向渗透率的下降。

关键词: 渗透率; 立体织物; 多尺度分析; 仿真模型; 单胞体积分数

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)09-0111-08

Prediction on permeability of 2.5D fabric using multi-scale simulation technology

ZHU Liping^{1,2}, FENG Jing¹, JIN Zicheng¹, YANG Cheng¹, GAO Weicheng²

(1. Nanjing Fiberglass R&D Institute Co., Ltd., Nanjing 210012, China;

2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract : Current methods of predicting the permeability of a three-dimensional fabric cannot completely consider internal complex micro structure and fluid dynamic behaviors in a three-dimensional fabric, not being able to realize a multi-scale analysis from micro to macro. A new multi-scale numerical model that can comprehensively analyze the permeability process of a three-dimensional fabric from fibre bundle to unit cell and to flat fabric was proposed and then the effect mechanisms of the internal micro constructure of a three-dimensional fabric on permeability performance was disclosed. By the transferring of each direction permeabilities of K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} from fibre bundle to unit cell and to flat fabric, the model realizes the three-scale transmissions of data and simulation from fibre bundle to unit cell and to flat fabric was achieved. At the same time, the correction factor of permeability was provided by comparing the experimental values and the calculated values of model, furtherly improving the prediction accuracy of the model. Based on this model, the study of influencing principles of constructure parameters of fabric on permeability was carried out. It is found that increasing the numbers of strands and densities of warp and weft all can increase the volume fraction of fabric. The permeability in the direction of weft is always the highest and that in the direction of warp is always the lowest. The increases of the densities of warp and weft cause the declines of permeabilities in the directions of warp, weft and unit cell thickness, the increase of the number of strands of weft results in the increase of permeability in the direction of weft and the drop of permeability in the direction of warp, and the increase of the numbers of strands of warp results in the increase of permeability in the direction of warp and the drop of permeability in the direction of weft.

Keywords : permeability ; three-dimensional fabric ; multi-scale analysis ; numerical model ; volume fraction of unit cell

基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BE2022008)

通信作者: 高维成, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为结构动力学与控制, 复杂结构模态分析、健康监测与控制

收稿日期: 2025-08-07

引用格式: 朱立平, 冯京, 金子程, 等. 2.5D 立体织物渗透率的多尺度仿真技术预测[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(9): 111-118.

ZHU Liping, FENG Jing, JIN Zicheng, et al. Prediction on permeability of 2.5D fabric using multi-scale simulation technology[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(9): 111-118.

纤维复合材料广泛应用于航空航天、船舶海洋、交通运输等领域^[1-2]。液体模塑成型工艺是目前制备纤维复合材料的主要工艺方法,液体树脂在真空、压力条件下,充分渗透在干纤维预制体内,再升温固化获得复合材料^[3-4]。树脂的渗透效果直接关系到纤维材料成型的成败,直接关系到成型纤维织物的透气性、透湿性、防水性等性能^[5-6]。渗透不佳带来的孔隙是复合材料构件内部最常见且无法避免的缺陷,直接影响制件的性能、表面质量和寿命^[7]。渗透率提升能有效提升产品性能。不同的织物单胞结构对树脂的渗透特性不同,若渗透特性不好,会造成发白的未浸润区域、孔隙的产生。渗透率是衡量树脂流动快慢和难易程度的参数,准确预测渗透率是成功实现纤维织物材料成型的重要前提条件之一。除了实验手段之外,数值仿真技术目前也成为获得渗透率的重要手段。纤维复合材料具有结构多尺度、各向异性等特点,其微观和宏观结构对织物工艺性能和复合材料宏观性质均有显著影响^[8-9]。因此,构建从纤维束到单胞再到平板织物层面的多尺度仿真模型,对准确解构织物内部渗透率具有重要意义。基于单胞模型的传统纤维复合材料建模方法大致可分为以模拟织物几何形貌为主要目的的简化理想模型^[10-11]和基于基本力学原理预测和构建复合材料微观结构的模型^[12-13]。目前,微观尺度纤维束离散模型主要采用有限元法和离散元法。有限元法方面, Sockalingam等^[14]建立了400根凯夫拉纤维的三维有限元模型。Wang等^[15]采用有限元方法分析了纺织纤维的弹道冲击特性,并证明了摩擦力是重要影响因素之一。离散元方面, André^[16]基于黏附力模型,通过改善离散单元法(DEM),用以模拟材料的连续介质部分,并且采用改善的DEM模型解决了离散单元间体积导致的人工空穴问题。Stapleton等^[17]使用DEM论证了平行纤维束存在一个代表性体积单元。

综上所述,尽管数值仿真技术在研究预测织物内部复杂流动、渗透方面取得了很多重要的进展,但目前少有充分考虑织物内部复杂的微观结构和流体动力学行为,实现从微观到宏观的多尺度分析的模型研究。为此,笔者提出了一种新的从纤维束到单胞再到平板碳纤维织物层面的多尺度预测立体碳纤维织物渗透过程的模型,并采用此模型分析研究了碳纤维织物结构参数对渗透率的影响规律。

1 多尺度模型的构建

树脂在织物中的流动包括在纤维束内的流动和纤维束间的流动,想要模拟其流动行为需要构建极为精细的几何模型,这会使网格数量极其庞大,计算量相应地极其庞大。因此,本项目将构建碳纤维织物多尺度计算模型,总体思路为:以上一层级(尺度)的计算结果作为下一层级的输入,逐层递进。具体实施步骤如图1所示,首先在纤维束层面上,通过纤维束模型的计算,得到纤维束沿单丝方向和垂直单丝方向的渗透率 K_{11}, K_{22} ;然后在单胞层面上,将渗透率 K_{11}, K_{22} 作为单胞模型中局部多孔介质区域的输入项,通过单胞模型的计算,得到单胞结构的各向渗透率 K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} ;最后在平板织物层面上,将渗透率 K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} 作为多孔介质模型的输入项。从而实现由纤维束到单胞再到平板织物三个尺度的数据及模拟传递。因此实现了多尺度模拟,相比现有的预测立体织物渗透率方法更有优越性。此外,由于每一层级的计算都存在不可避免的计算误差,为此,通过对比平板碳纤维织物层面渗透率的实验数据和理论计算值,获得修正系数,从而改进理论计算模型的计算参数。

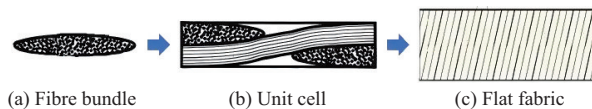


图1 多尺度模型计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-scale model calculation

1.1 树脂流动数学模型

单胞层面的流动耦合了纤维束内部和纤维束间的流动,但由于树脂在纤维束内部微小孔隙中的流动细节可以忽略不计,因而可近似视为连续性介质在多孔介质中的局部均质稳态层流流动。因此,纤维束层面的流动可以采用一般的流动模型描述,包括质量守恒方程和动量守恒方程,分别见公式(1)和公式(2)。

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

式中: ρ 为密度,单位 kg/m^3 ; u 为流体的速度,单位 m/s ; x_i, x_j 和 x_k 分别表示 x, y, z 三个坐标轴方向; u_i, u_j, u_k 分别为沿着向量 i, j, k 的速度分量,单位 m/s ; p 为压力,单位 Pa ; μ 为气体的动力黏度,单位 kg/

(m·s)。

此处需要重点指出的是,守恒方程在描述树脂在碳纤织物中流动过程时,还需通过渗透率来修正,一般采用达西定律。实施方法是在迭代过程中,在每个迭代步中首先求解出压力场,便可以用达西定律求解出新的速度场,再将速度场带入守恒方程从而求解出新的压力场。达西定律定义如下:

$$v = -\frac{K}{\mu} \nabla P \quad (3)$$

式中: v 为表面速度矢量; K 为纤维材料的渗透率张量; ∇P 为压力梯度; μ 为树脂的动力黏度。

1.2 渗透率模型

渗透率是纤维材料的固有属性,它描述了织物或预制体对树脂流动的阻碍作用,是微观材料物理性能与宏观产品质量的桥梁与纽带。因此,准确的渗透率数据是获得可靠模拟结果的关键因素之一。本项目的渗透率模型包括纤维束层面的渗透率计算和所建不同碳纤织物单胞层面的渗透率计算两个部分。

在纤维束层面,纤维单丝直径微米级别,数量很多,难以对一根纤维束直接建模计算。相关研究表明^[18],影响纤维束内渗透率的主要因素为单丝体积分数。因此,本项目采用穷举法来逼近纤维束的实际渗透率,即固定纤维束内单丝体积分数不变,改变单丝个数,由少到多建立系列纤维束模型进行模拟计算。以一根直径7 μm、数量12 K纤维束内纤维单丝为例,设计模拟工况见表1,将表1中数据绘制成渗透率随纤维直径变化的曲线图,在曲线趋平处停止举例,以该处渗透率作为纤维束的预测渗透率。

表1 纤维束渗透率模拟工况

Tab. 1 Simulation conditions of fabric bundle permeability

Number	Diameter	Volume fraction	K_{11}	K_{22}
10	d_1	$x\%$		
25	d_2	$x\%$		
50	d_3	$x\%$		
100	d_4	$x\%$		
...	d	$x\%$		
n	d_n	$x\%$	$K_{11 \text{ predicted value}}$	$K_{22 \text{ predicted value}}$

在单胞层面,忽略单丝之间的微观流动,将纤维束看成多孔介质区域。以图2所示的2.5 D单胞为例,根据达西定律,其 x 方向的渗透率 K_{xx} 由式(4)给出。考虑到织物结构各向异性, y 方向和 z 方向的渗透率也可采用同样方法分别获取。

$$K_{xx} = -\frac{v}{(P_{x,\text{in}} - P_{x,\text{out}})} \mu \quad (4)$$

式中: $P_{x,\text{in}}$ 表示 x 方向进口压力; $P_{x,\text{out}}$ 表示 x 方向出口压力; μ 为树脂的动力黏度。

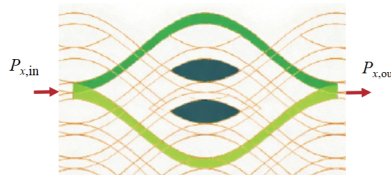


图2 单胞法计算织物各相异性渗透率

Fig. 2 Calculation of anisotropic permeability of fabric using unit cell method

1.3 单胞几何模型构建

1.3.1 立体碳纤织物的结构与特性

为了建立真实的碳纤织物结构模型,以精确地计算织物渗透率,采用CT扫描技术获得2.5D织物纵切截面,如图3所示。图中附有标尺,获得织物经纬纱的尺寸和结构信息。

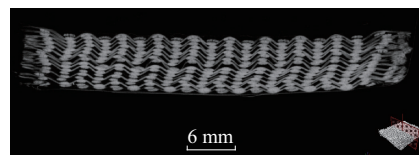


图3 2.5D碳纤织物截面CT扫描

Fig. 3 CT scan of section of 2.5 D carbon fiber fabric

截取部分清晰规则的2.5D纵向截面CT图像,构建其对应的几何结构,采用规则的椭圆经纬纱截面来拟合纱线形状。图4a和图4b分别为CT图像和几何构图。

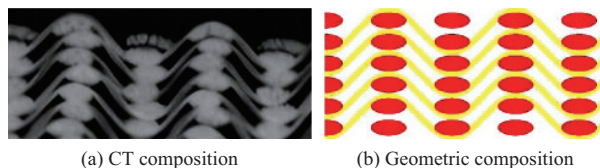


图4 碳纤织物局部几何建模

Fig. 4 Local geometric modeling of carbon fiber fabric

根据2.5D碳纤织物拟合的几何结构周期性对称的结构特征,取其最小可重复性单元构建单胞模型,如图5所示。树脂流体在碳纤织物中的流动行为不仅包括纤维束间的细观流动,也包括纤维束内的微观流动,即纤维单丝间的微观流动。但树脂在纤维束内部微小孔隙中的流动相较纤维束间流动非常微小,可以忽略不计。因此,2.5D单胞模型采用多丝结构,这样可以更好地还原真实结构,模拟计算获得更精确的渗透率。同时,图5为 K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 渗

透率的方向进行了标注,以方便后面的计算分析。

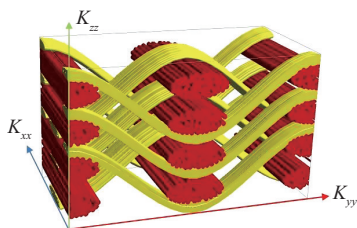


图5 2.5D单元模型

Fig. 5 2.5D unit cell model

1.3.2 单丝根数无关性检测

为保证模拟结果的准确性,需要对单元模型分别进行单丝根数和网格方面的无关性检测。

图6显示了纱束内单丝填充系数一定的前提下,织物渗透率随单丝根数增加的变化。最终取的模拟根数的评判标准为:该点与前后点的误差在2%以内;该点与前后至少两个点的变化趋势不能呈现单调递增或者递减。满足评判标准的 n 最小值为60,因此用 $n=60$ 的单元作为渗透率计算的模型。

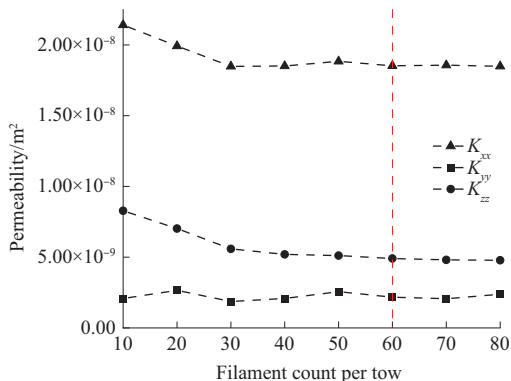


图6 单丝根数无关性检测

Fig. 6 Independence detection of number of unit fibers

网格无关性检测是平衡数值计算量与计算精度最重要的指标。图7为不同单丝截面网格个数条件下单元结构的各向渗透率。由图可知,根据纤维

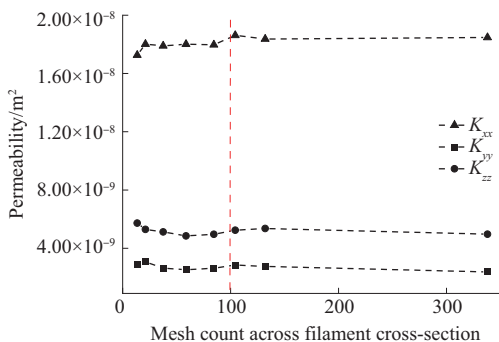


图7 网格无关性检测

Fig. 7 Grid independence detection

单丝的直径设置网格尺寸大小,以单丝截面网格数量为横坐标,当纱束内单丝根数为60时,单丝截面内网格数量超过100之后,渗透率几乎不再随网格数量改变。因此,每个单元取单丝截面以100个网格来划分体网格。

2 实验校正碳纤维织物渗透率

2.1 渗透率测量实验平台

如前所述,CFD仿真时模型及计算条件做了部分简化假设,因此单元渗透率的数值计算结果并不能与实际完全吻合,为此,需要通过实验测量数据进行校正。此处,通过平板织物层面渗透率的实验数据和理论计算值对照,获得渗透率修正系数。

目前常用的实验测定碳纤维织物面内渗透率的方法包括两类:单向饱和流动法和二维径向流动法。一维单向流动法测定预成型体渗透率时容易受到“边缘效应”的影响,使得树脂流动前沿变得不规则,树脂流动前沿位置测量准确性得不到保证,计算所得预成型体渗透率值偏差较大。而二维径向流动法的进胶口位于预成型体中心,因而不会受到“边缘效应”的影响,测定过程较为方便直接。

本项目采用径向法测试面内渗透率,借助视觉识别系统实时测量并记录树脂流动前沿离灌注口的横向(沿织物经向)距离及纵向(沿织物纬向)距离。图8为织物渗透率测试实验台。

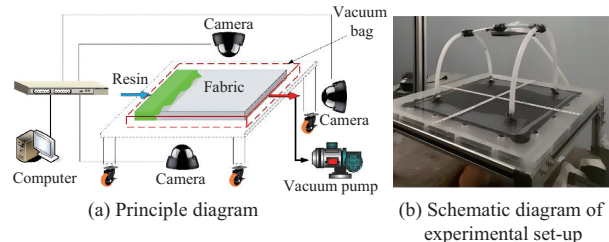


图8 二维径向流动法渗透率测试实验台

Fig. 8 Bench for permeability test using 2D radial flow method

实验采用径向法进行树脂灌注,观察并记录树脂的流动前沿的渗透时间。测试步骤如下。

①用模具清理剂将玻璃板(模具)清洗干净。同时裁剪指定尺寸的碳纤维织物、脱模布,准备好辅助材料。

②铺放织物,使用黑密封胶带将其四角固定,以防受到树脂流动冲击而产生移动变形。使用黑密封胶带隔一定距离环绕织物铺设一周,隔离内部系统空间与外界空间,抽气后在织物区形成真空区以防周边空气吸入系统内。将脱模布、真空袋膜依

次从下到上铺放到织物上,然后使用螺旋管在碳纤维织物四周设置树脂出胶口,并在碳纤维织物中心设置好树脂进胶口。实验材料铺放完成后,将真空袋膜与黑密封胶带黏结进行密封处理。

- ③安装好摄像头,对准树脂流动平面。
- ④检查装置气密性。
- ⑤抽真空后,用刻度胶条在真空袋上,以注胶口为中心,正交方向贴好刻度胶条。
- ⑥打开摄像机,并开始注入树脂。记录每一时刻树脂流动前沿位置,得到树脂流动前沿与时间的关系。
- ⑦待树脂填充到指定刻度后,先关闭树脂注入端阀门再关闭抽气口阀门。

测试完成后,再由式(5)和(6)求得织物的渗透率 K_{xx} 和 K_{yy} 。

$$K_{xx} = \frac{\mu \varphi R_{xt}^2}{4 \Delta P t} \left[2 \ln \left(\frac{R_{xt}}{R_0} \right) - 1 \right] \tag{5}$$

$$K_{yy} = \frac{\mu \varphi R_{yt}^2}{4 \Delta P t} \left[2 \ln \left(\frac{R_{yt}}{R_0} \right) - 1 \right] \tag{6}$$

式中: μ 为树脂黏度; φ 为碳纤维织物孔隙率; R_0 为树脂注入口半径; R_x 和 R_y 为 t 时刻对应的树脂在碳纤维织物面内两个方向上流动前沿的位置。

2.2 渗透率实验参数与测量结果

实验样品采用2.5D浅交直联结构,表2给出了织物结构信息。树脂采用的是常温下的环氧树脂,黏度常温状态下500~600 mPa·s。测试基本参数详见表3。

表2 2.5D结接边(浅交直联)织物结构信息

Tab. 2 Structure information of 2.5D bundle edge (shallow cross straight-interlacing) fabric

No	Warp density/ (Ends·cm ⁻¹)	Strand number	Weft density/ (Picks·cm ⁻¹)	Strand number	Molding thickness/mm	Fibre volume fraction/%
H5	6	2	4	3	0.35	50.0

表3 基本测试参数

Tab. 3 Basic test parameters

Item	number
Fabric porosity/%	50.0
Resin viscosity/(mPa·s)	550
Radius of inject glue entrance/mm	4.5
Injection pressure/Pa	99 000

图9记录了三个不同时间点的织物上浅交直联H5结构表面树脂流动状态。由图9可以看出,随着时间的推移,灌注区域不断扩大,流动前缘接近于椭圆。

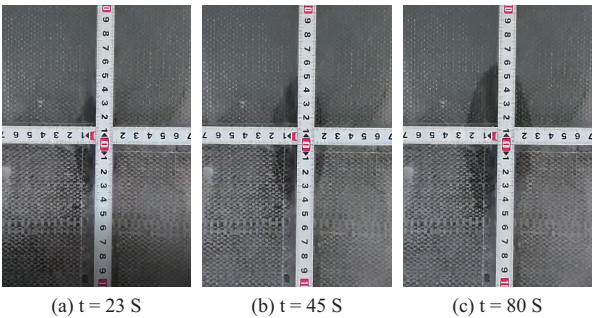


图9 H5织物结构表面树脂流动状态

Fig. 9 Resin flow situation on surface structure of H5 fabric

图10给出了不同时刻流动前缘的长半轴与短半轴长度。横坐标为渗透时间(s),纵坐标为流动前缘位置(cm)。将测得的试验数据代入公式(5)和公式(6),渗透率 K_{xx} 和 K_{yy} 见表4。

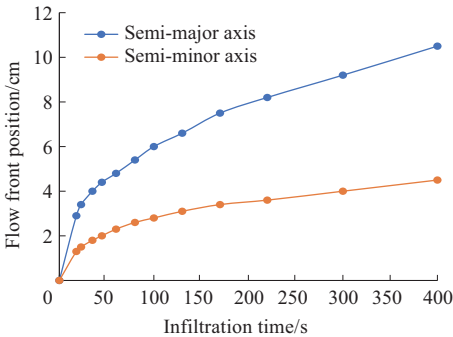


图10 织物渗透随时间变化

Fig. 10 Change of permeabilities of fabric over time

表4 织物渗透率

Tab. 4 Permeabilities of fabric

Item	2.5D shallow cross straight-interlacing(H5)
K_{xx}/m^2	2.21×10^{-10}
K_{yy}/m^2	2.36×10^{-11}

2.3 渗透率仿真计算与修正

与此同时,基于与实验相同的织物结构进行CFD渗透率仿真实验,获得单胞结构内的速度分布、压力分布等流场参数。图11显示了浅交直联结构内的速度分布和压力分布,其中 x 为纬纱方向, y 为经纱方向。表5给出了浅交直联结构的渗透率仿真结果。

将CFD仿真结果与实验结果对照,实验值 K^* /模拟值 K 均超过0.8,两者规律性一致,由于未考虑

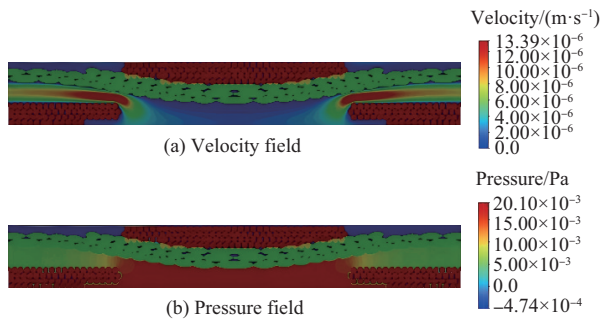


图 11 浅交直联结构内的速度和压力分布

Fig. 11 Velocity and pressure distribution in shallow cross straight-interlacing structure

表 5 渗透率仿真结果

Tab. 5 Simulated results of permeabilities

Item	2.5D shallow cross straight-interlacing(H5)
K_{xx}/m^2	2.73×10^{-10}
K_{yy}/m^2	2.87×10^{-11}

纤维表面作用等因素,存在一些误差。因此对仿真结果进行修正,并以 K_{xx} 和 K_{yy} 修正系数的算术平均值作为修正系数,用于后续仿真计算,详见表 6。

表 6 浅交直联 H5 织物渗透率模拟/试验结果对比

Tab. 6 Comparison between simulation and experiment results of permeabilities of shallow cross straight-interlacing H5 fabric

Item	Simulated value K/m^2	Experimental value K^*/m^2	K^*/K	Correction coefficient C
K_{xx}	2.73×10^{-10}	2.21×10^{-10}	0.809	0.815
K_{yy}	2.87×10^{-11}	2.36×10^{-11}	0.821	

3 织物结构参数对渗透率影响规律的多尺度仿真与分析

采用控制变量法来研究织物结构参数对渗透率的影响规律,即改变其中一种结构参数,其他结构参数不变。织物结构参数包括纱线规格、纱线密度、花节长度等,这些结构参数的改变都将引起单胞体积分数和渗透率的改变,因为两者均是结构的函数。本文考虑的 2.5D 织物结构参数包括经纱规格、纬纱规格、经密以及纬密。

3.1 纬密对渗透率的影响

为研究纬密变化对渗透率的影响,保持其他结构参数保持不变,改变 2.5D 单胞纬密,从 7 根/cm 起以 0.5 根/cm 增幅逐步递增至 9 根/cm,模拟计算了不同纬密条件下的 2.5D 单胞各向渗透率和体积分数。图 12 显示了纬密在 7 根/cm 至 9 根/cm 的 2.5D 单胞各向渗透率和体积分数。从图中可以看到,纬纱方向(x 向)的渗透率远高于经纱方向(y 向)和单胞厚度方向(z 向)的渗透率,单胞厚度方向的渗透率又高于经纱方向的渗透率。随着纬密增加,2.5D 单胞体积

分数也在增加,纬密 9 根/cm 的相对于 7 根/cm 的增加 8.95%;单胞各向渗透率随纬密呈下降的趋势,纬密 9 根/cm 的纬纱方向、经纱方向、单胞厚度方向的渗透率相对于 7 根/cm 的分别下降 18.33%,32.11%,59.97%。可知,随着纬密的增加,单胞厚度方向渗透率下降最快,经纱方向次之,纬纱方向最慢。

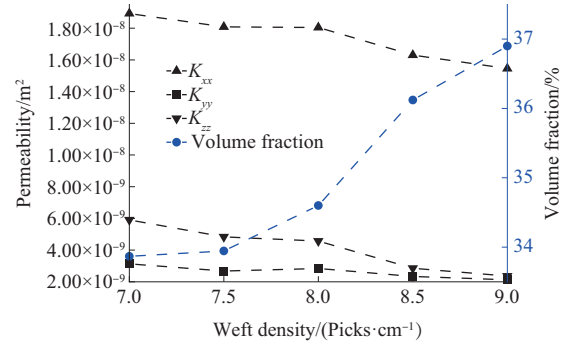


图 12 纬密 7 根/cm 至 9 根/cm 的 2.5D 单胞各向渗透率和体积分数

Fig. 12 Permeabilities in all directions and volume fraction of 2.5 D unit cell with 7-9/cm densities of weft

3.2 经密对渗透率的影响

为进一步获得经密变化对渗透率的影响,保持其他结构参数保持不变,改变 2.5D 单胞经密,从 2.5 根/cm 开始,以 0.5 根/cm 增幅,逐步递增至 4.5 根/cm,模拟计算了不同经密的 2.5D 单胞各向渗透率和体积分数。图 13 显示了经密 2.5 根/cm 至 4.5 根/cm 的 2.5D 单胞各向渗透率和体积分数。由图可以看到,渗透率和体积分数随经密变化规律与其随纬密变化规律具有相似性。随着经密的增加,单胞体积分数也增加,经密 4.5 根/cm 的相对于 2.5 根/cm 的增加 43.64%。纬纱方向渗透率高于厚度方向渗透率,厚度方向渗透率又高于经纱方向

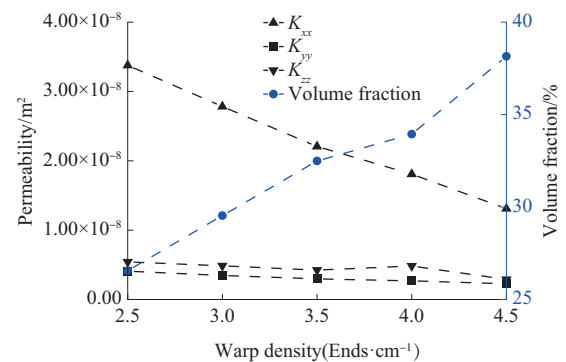


图 13 经密 2.5 根/cm 至 4.5 根/cm 的 2.5D 单胞各向渗透率和体积分数

Fig. 13 Permeabilities in all directions and volume fraction of 2.5D unit cell with 2.5-4.5/cm densities of warp

向渗透率。各向渗透率总体呈现下降趋势,经密4.5根/cm的纬纱方向、经纱方向、单胞厚度方向的渗透率相对于2.5根/cm的分别下降61.17%,44.56%,46.73%。可知,随着经密的增加,经纱方向渗透率下降最快,纬纱和单胞厚度方向次之并且下降幅度相差不多。

3.3 纬纱规格对渗透率的影响

为探究纬纱规格改变对渗透率的影响规律,保持纱线的截面形状不变,椭圆的长短轴之比不变,其他结构参数均保持不变,改变2.5D单胞纬纱规格,从2股开始以1股的增幅逐步递增至6股——对应的椭圆长短轴分别为 $854\text{ }\mu\text{m}\times 362\text{ }\mu\text{m}$, $1\text{ }046\text{ }\mu\text{m}\times 446\text{ }\mu\text{m}$, $1\text{ }208\text{ }\mu\text{m}\times 515\text{ }\mu\text{m}$, $1\text{ }350\text{ }\mu\text{m}\times 576\text{ }\mu\text{m}$, $1\text{ }479\text{ }\mu\text{m}\times 631\text{ }\mu\text{m}$ ——模拟计算了不同纬纱规格的2.5D单胞各向渗透率和体积分数。图14显示了从2股至6股纬纱规格的2.5D单胞各向渗透率和体积分数。从图中可以看到,单胞体积分数随着纬纱规格的增大而增大,6股纬纱规格的相对于2股的增加26.86%。纬纱方向渗透率逐渐增大,6股的相对于2股的增大23.47%;经纱方向的渗透率呈下降趋势,6股的相对于2股的下降35.83%;厚度方向渗透率有小幅上升和下降,变化并不明显。

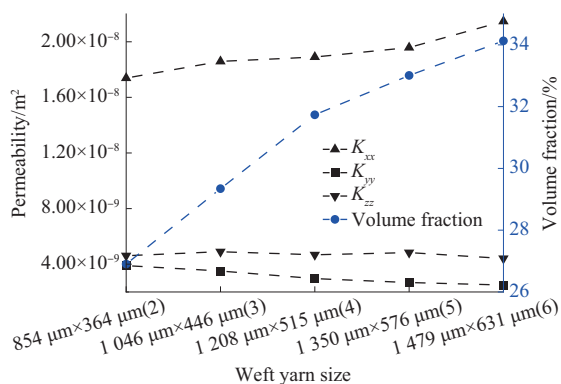


图14 纬纱规格2股至6股的2.5D单胞各向渗透率和体积分数

Fig. 14 Permeabilities in all directions and volume fraction of 2.5D unit cell with 2-6 strands of weft

3.4 经纱规格对渗透率的影响

为掌握经纱规格变化对渗透率的影响,保持纱线的截面形状和椭圆的长短轴之比不变,其他结构参数均保持不变,改变2.5D单胞经纱规格,从2股开始以1股增幅递增至6股——对应的椭圆长短轴分别为 $619\text{ }\mu\text{m}\times 121\text{ }\mu\text{m}$, $758\text{ }\mu\text{m}\times 149\text{ }\mu\text{m}$, $875\text{ }\mu\text{m}\times 172\text{ }\mu\text{m}$, $978\text{ }\mu\text{m}\times 192\text{ }\mu\text{m}$, $1\text{ }071\text{ }\mu\text{m}\times 210\text{ }\mu\text{m}$ ——模拟计算不同经纱规格的2.5D单胞各向渗透率和体积分数。图15显示了经纱规格2股至6股的2.5D

单胞各向渗透率和体积分数。从图中可以看到,随着经纱规格的增大,单胞体积分数也在增大,6股的相对于2股的增加16.36%。纬纱方向和厚度方向的渗透率呈下降趋势,6股的相对于2股的分别下降22.67%、72.10%;经纱方向的渗透率呈上升趋势,6股的相对于2股的上升达47.64%。

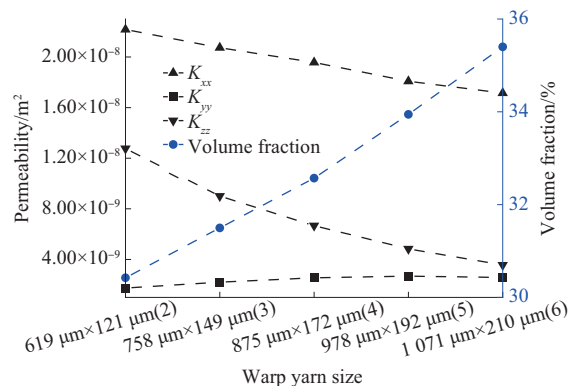


图15 经纱规格2股至6股的2.5D单胞各向渗透率和体积分数

Fig. 15 Permeabilities in all directions and volume fraction of 2.5D unit cell with 2-6 strands of warp

4 结论

为从纤维束到单胞再到平板织物层面,全面模拟立体织物的渗透过程,提出了一种可以预测2.5D立体织物渗透率的多尺度仿真方法,并以实验测量渗透率补充修正模拟计算值。并且,以此多尺度仿真方法数值研究了不同经纱规格、纬纱规格、经密及纬密结构参数下的织物渗透率和体积分数。获得结论如下:

(1)提出的多尺度计算模型,以上一层级的计算结果作为下一层级的输入,逐层递进,可以避免构建织物模型时需构建过于精细的几何模型,从而减小网格数量和计算量,同时又能获得较好的预测效果。

(2)经纱、纬纱股数和经密、纬密的增加均能导致织物单胞纤维体积分数的明显增加。

(3)纬纱方向渗透率始终是最高的,而经纱方向的渗透率则始终是最低的。

(4)经密、纬密的增加导致纬纱、经纱和单胞厚度三个方向渗透率呈下降趋势;纬纱股数的增加导致纬纱方向渗透率上升和经纱方向渗透率下降;而经纱股数的增加导致纬纱方向渗透率下降以及经纱方向渗透率上升。

参考文献

- [1] 王珏,晏石林,李永静,等. 剪切变形对各向异性织物主渗透率及浸润特性的影响[J]. 纺织学报, 2024, 45(12): 109-117.

- WANG Jue, YAN Shilin, LI Yongjing, et al. Effect of shear deformation on principal permeability and infiltration characteristics of anisotropic fabrics[J]. *Journal of Textile Research*, 2024, 45(12): 109–117.
- [2] 丛晶洁,陈志平,刘强. 新型液体成型技术在民机副翼结构的应用研究[J]. *宇航材料工艺*, 2018, 48(2):91–94.
- CONG Jingjie, CHEN Zhiping, LIU Qiang. Application research of new liquid molding technology for civil flap[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2018, 48(2):91–94.
- [3] 乐午阳,罗浩,吴医博,等. 基于椭圆张量叠加的剪切变形二维纤维织物渗透率预测模型[J/OL]. *复合材料科学与工程*, 2024: 1–10. (2024-07-02). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=BLGF20240617007&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- LE Wuyang, LUO Hao, WU Yibo, et al. Permeability prediction model of shear deformation two-dimensional fiber fabric based on elliptic tensor superposition[J/OL]. *China Industrial Economics*, 2024: 1–10. (2024-07-02). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=BLGF20240617007&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [4] GEREKE T, CHERIF C. A review of numerical models for 3D woven composite reinforcements[J]. *Composite Structures*, 2019, 209:60–66.
- [5] 杨斌,王继辉,冯雨薇,等. 织物增强复合材料Micro-CT辅助数值仿真技术研究进展[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(10):5 466–5 485.
- YANG Bin, WANG Jihui, FENG Yuwei, et al. Advances in Micro-CT aided numerical simulation of fabric-reinforced composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(10):5 466–5 485.
- [6] ZENG X S, ENDRUWEIT A, BROWN L P, et al. Numerical prediction of in-plane permeability for multilayer woven fabrics with manufacture-induced deformation[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 77:266–274.
- [7] WADEKAR P, GOEL P, AMANATIDES C, et al. Geometric modeling of knitted fabrics using helicoid scaffolds[J]. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2020, 15. DOI: 10.1177/1558925020913871.
- [8] 闫超. 复合材料壁板液体成型渗透行为研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2022.
- YAN Chao. Study on infiltration behavior of composite wallboard in liquid forming[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2022.
- [9] ALI M A, GUAN Q S, UMER R, et al. Efficient processing of μ CT images using deep learning tools for generating digital material twins of woven fabrics[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 217. DOI:10.1016/j.compscitech.2021.109091.
- [10] 缙依锟,段跃新,宁博,等. 捆绑纱线密度变化对经编织物复合材料性能的影响[J]. *复合材料科学与工程*, 2023(4):21–26.
- GOU Yikun, DUAN Yuexin, NING Bo, et al. Effect of binding yarn linear density change on properties of non-crimp fabrics composites[J]. *Composites Science and Engineering*, 2023(4): 21–26.
- [11] 曹鹏军,赵文斌,杨斌,等. 基于Micro-CT图像的缎纹织物微观结构分析及渗透率预测[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(3):1 751–1 763.
- CAO Pengjun, ZHAO Wenbin, YANG Bin, et al. Meso-structure analysis and permeability prediction of satin fabric based on Micro-CT[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(3): 1 751–1 763.
- [12] RAJAB M A, GEORGE L E. Stamps extraction using local adaptive k-means and ISODATA algorithms[J]. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2021, 21(1). DOI: 10.11591/ijeecs.v21.i1.pp137-145.
- [13] 刘晓,余映红,崔曦月,等. 纤维预制体渗透率测量技术研究进展[J]. *航空制造技术*, 2024, 67(5):28–43.
- LIU Xiao, YU Yinghong, CUI Xiyue, et al. Progress on permeability measurement techniques of fiber reinforcement[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2024, 67(5):28–43.
- [14] SOCKALINGAM S, GILLESPIE J W Jr, KEEFE M. Modeling the fiber length-scale response of Kevlar KM2 yarn during transverse impact[J]. *Textile Research Journal*, 2017, 87(18):2 242–2 254.
- [15] WANG Y, CHEN X G, YOUNG R, et al. Finite element analysis of effect of inter-yarn friction on ballistic impact response of woven fabrics[J]. *Composite Structures*, 2016, 135:8–16.
- [16] ANDRÉ D, IORDANOFF I, CHARLES J L, et al. Discrete element method to simulate continuous material by using the cohesive beam model[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2012, 213:113–125.
- [17] STAPLETON S E, APPEL L, SIMON J W, et al. Representative volume element for parallel fiber bundles: Model and size convergence[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 87:170–185.
- [18] 吕良,圣晓荣,潘利剑,等. 国产自动铺放干纤维渗透特性的多尺度仿真分析[J]. *合成纤维*, 2025, 54(3):60–66.
- LYU Liang, SHENG Xiaorong, PAN Lijian, et al. Simulation and analysis of permeability characteristics of domestic automatic laying drying fiber[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2025, 54(3): 60–66.