

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.07.012

建筑气密膜无纺布增强层透湿性能的细观建模仿真

匡宁^{1,2}, 金子程², 周光明¹, 朱立平², 钱征华¹, 冯京², 杨成²

(1.南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室,南京 210016; 2.南京玻璃纤维研究设计院有限公司,南京 210012)

摘要:为研究建筑用气密膜增强层材料(涤纶纤维无纺布材料)的细观尺度透湿性能,通过虚拟生成技术,构建了以体素网格为基本单元的细观尺度纤维集合体结构模型,基于计算流体力学(CFD)仿真方法系统研究了孔隙率(φ)、纤维直径(d_f)以及纤维空间分布规律对材料透湿性能的影响机制,定量分析了材料细观结构参数与透湿性能之间的构效关系。研究表明,随着增强层材料 φ 的增大,等体积空间内的纤维数目有所减少,固相材料对水蒸气浓度分布的影响被削弱,材料的 φ 与有效扩散系数(D_{eff})呈线性正相关。 d_f 的变化对透湿性能的影响呈现非线性特征:当材料的 d_f 较小时,单位体积内的纤维数量较多,水蒸气的扩散通路受到显著堵塞,随着 d_f 的增大,固相材料对水蒸气的阻塞效果逐渐减弱, D_{eff} 随之增大,当 d_f 超过20 μm 后, D_{eff} 趋于稳定,不再随 d_f 变化。此外,纤维空间分布的各向异性特征对透湿性能具有显著影响,当纤维主要沿材料平面方向分布时,水蒸气输运方向更接近于垂直纤维法向,导致扩散阻力增大, D_{eff} 减小。本研究为气密膜增强层材料的结构设计和性能优化提供了理论依据和数据支持,有助于提高建筑节能效果。

关键词:气密膜;增强层;纤维材料;细观尺度;透湿性能;数值仿真

中图分类号: TB324 文献标识码: A 文章编号: 1001-3539(2025)07-0075-08

Mesoscopic simulation of moisture permeability for nonwoven reinforcement layers in air-tight membranes for building applications

KUANG Ning^{1,2}, JIN Zicheng², ZHOU Guangming¹, ZHU Liping², QIAN Zhenghua¹, FENG Jing², YANG Cheng²

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Nanjing Fiberglass Research & Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210012, China)

Abstract : To study the mesoscale moisture permeability of polyester fiber non-woven fabric materials, which are used as reinforcing layers for airtight membranes in buildings, a mesoscopic fiber assembly structure model with voxel grids as basic unit was constructed using virtual generation technology. Based on computational fluid dynamics (CFD) simulation methods, a systematic study was conducted on the influence mechanisms of porosity (φ), fiber diameter (d_f), and spatial fiber distribution patterns on moisture permeability, with quantitative analysis of structure-performance relationships between mesoscopic structural parameters of material and its moisture permeability. Results show that as the φ of the reinforcement layer material increases, number of fibers in an equal volume space decreases, weakening the impact of solid-phase material on distribution of water vapor concentration. There is a linear positive correlation between material's φ and effective diffusion coefficient (D_{eff}). The effects of d_f variation on moisture permeability presents nonlinear characteristics as follows: when d_f is small, the number of fibers per unit volume is relatively large, leading to significant blocking of water vapor diffusion pathways. As d_f increases, the blocking effect of solid-phase material on water vapor gradually weakens, and D_{eff} increases accordingly. When d_f exceeds 20 μm , D_{eff} tends to stabilize and no longer changes with d_f . In addition, anisotropic characteristics of spatial fiber distribution have a significant impact on moisture permeability. When fibers are mainly distributed along material's planar direction, water vapor transport direction is closer to direction perpendicular to fiber normal, resulting in increased diffusion resistance and decreased D_{eff} . This study provides the theoretical basis and the data support for structural design and performance optimization of air-tight membrane reinforcement layer materials, which is conducive to improving building energy efficiency.

Keywords : air-tight membrane ; reinforcement layer ; fiber material ; meso-scale ; moisture permeability ; numerical simulation

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3806204)

通信作者: 金子程, 博士, 工程师, 研究方向为多孔介质内的多相流动及耦合传热

收稿日期: 2025-03-14

引用格式: 匡宁, 金子程, 周光明, 等. 建筑气密膜无纺布增强层透湿性能的细观建模仿真[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(7): 75-82.

KUANG Ning, JIN Zicheng, ZHOU Guangming, et al. Mesoscopic simulation of moisture permeability for nonwoven reinforcement layers in air-tight membranes for building applications[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7): 75-82.

墙体与外窗之间的节点过渡部位是影响建筑节能效果的薄弱部位,普通建筑外窗系统因热桥效应显著、防水密封性能不足等原因,易导致墙体开裂、脱落及霉变等问题,严重影响建筑使用寿命与室内环境质量^[1-4]。欧盟等发达国家在被动式建筑与零能耗建筑领域起步较早,已形成完善的气密性外围护结构技术体系。德国弗劳恩霍夫建筑物理研究所、海德堡能源环境研究所等机构通过系统性研究,开发了高性能防水气密性材料体系,显著提升了节点过渡部位的防水、气密与耐久性能,并建立了成熟的评价标准与规范^[5]。相比之下,我国气候区多样性强,建筑围护结构面临的湿热耦合作用更为复杂,气密膜材料的研发仍存在理论基础薄弱、设计参数不明确等问题。自2009年起,住建部科技与产业化发展中心与德国能源署合作推进被动式建筑技术,虽引入了气密性材料体系,但其本土化适配与性能优化仍需深入探索。

在气密膜材料体系中,复合无纺布气密膜因兼具力学与透湿性能而被广泛应用,其结构通常由功能层与增强层复合构成。功能层以高分子材料为主,通过化学改性或微孔结构设计实现防水透湿;增强层则多采用水刺无纺布等纤维多孔材料,如图1所示。水刺无纺布的主要材料包括天然纤维(如棉、麻、竹纤维等)、化学纤维(如涤纶、丙纶等)、再生纤维(如黏胶、莫代尔、莱赛尔等)及功能性纤维(如超细纤维、低熔点纤维等),本研究中采用的是涤纶纤维无纺布材料。



图1 增强层水刺无纺布材料

Fig. 1 Spunlace nonwoven material in reinforcement layer

无纺布材料的透湿性能直接决定了气密膜整体功能^[6-8],研究表明,水蒸气在增强层内的传递机制与材料的细观孔隙结构密切相关,孔隙率(φ)、纤维直径(d_f)及纤维空间分布等参数通过改变扩散路径显著影响透湿效率^[9-12]。因此,构建材料细观结构模型并开展透湿性能仿真,是优化气密膜设计的

关键。

近年来,多孔介质透湿性能的数值模拟研究取得显著进展。在宏观尺度上,基于达西定律的渗透模型被广泛用于预测多孔材料的有效扩散系数(D_{eff}),Wang等^[13-14]以相对湿度梯度和温度梯度作为驱动势,扩展了热湿耦合传递驱动模型。在孔隙尺度层面,Moghadam等^[15]采用随机算法生成非织造材料的细观结构,结合计算流体力学(CFD)模拟发现纤维的空间分布特性对材料的透湿性能影响显著;Cao等^[16]提出基于Voronoi图的半解析模型,实现了纤维介质过滤效率与透湿性能的耦合分析;Salomov等^[9]采用显微计算机断层扫描(μ -CT)技术重构纤维多孔介质的三维结构,结合CFD仿真技术模拟了孔隙内流体的传质过程,验证了克努森数(Kn 数)对扩散机制转变的调控作用;Wang等^[17]提出了一种分层排布的纤维结构生成算法,该算法采用适当缩小纤维杆直径的方法来避免纤维杆间相互接触,文中对不同结构的渗透率进行了模拟;Vahedi等^[18]基于GeoDict软件,采用两种不同直径的纤维杆组成了分层排布式的多孔结构,分析了介质内纤维杆直径非均匀性对材料渗透性能的影响。在介观尺度,格子玻尔兹曼方法(LBM)与耗散粒子动力学因其对复杂孔隙结构的适应性而备受关注,例如,Safi等^[19-20]以聚合物电解质燃料电池的气体扩散层(纤维多孔材料)为研究对象,利用X射线断层扫描显微镜获得材料的真实形貌特征并重构孔隙结构,采用三维LBM模拟了材料内气相混合物的孔隙尺度流动与质量扩散过程。此外,分子动力学模拟从原子尺度揭示了材料化学特性对透湿性能的作用机制。由此可见,材料的多尺度结构设计是突破透湿性能瓶颈的有效途径。

总体而言,目前应用于多孔介质孔隙尺度模拟的数值方法主要有两类,一类是基于连续介质假说的传统CFD模拟方法,例如有限体积法(FVM)以及有限元法(FEM)等;另外一类则是采用介观方法进行模拟,例如LBM。

尽管上述研究取得了丰硕成果,气密膜增强层材料的细观结构优化仍面临挑战,相关设计技术仍不够完善,纤维空间分布的各向异性特征与透湿性能的定量关系尚未明确。因此,笔者以水刺无纺布增强层材料为对象,采用虚拟生成技术构建细观尺度纤维集合体模型,通过CFD仿真系统研究 φ 、 d_f 及

纤维空间分布对透湿性能的影响规律,旨在揭示材料结构-性能的构效关系,为气密膜的功能优化提供理论支撑。

1 模型构建与透湿模拟

1.1 气密膜增强层细观建模方法

气密膜增强层所采用的水刺无纺布材料,是一种典型的纤维多孔材料,水蒸气可以通过纤维间的孔隙进行传递,其传递规律与材料的细观孔隙结构密切相关,因此,能否准确的构造出材料的细观结构决定了后续透湿性能仿真的准确性。

目前,构建增强层材料细观结构的方法主要分为图形重构技术与虚拟生成技术两类。扫描重构技术是图形重构技术的核心实现方式,主要通过高分辨率影像技术获取材料的细观信息,典型技术包括 μ -CT技术和扫描电子显微镜(SEM)技术等^[9-11]。扫描重构技术的优势在于所构建的结构能高度贴合实际情况,但这一特性也限制了其在参数优化研究中的灵活性。相比之下,基于对材料内部真实结构的认识,利用计算机模拟生成孔隙结构的虚拟生成技术,具有灵活性高、易用性强的优点^[15-16,21-22],可以对细观结构特征进行参数化研究。

为便于探索材料细观结构与透湿性能之间的关系,笔者采用虚拟生产技术,以体素网格为基本单元,构建增强层纤维材料的细观尺度结构,具体流程参见图2,主要分为以下几步。

(1)计算域构建:在笛卡尔坐标系下给定 X, Y, Z 三个方向的建模尺寸,构建包围盒形式的计算域,采用体素网格离散空间,设定网格分辨率,确保纤维直径尺寸内至少包含5个网格节点,以保证几何精度。

(2)边界条件设置:计算域边界采用周期性边界条件,如图3所示,以消除边缘效应对扩散过程的影响,模拟无限大均匀多孔介质。

(3)结构与计算参数定义:设定目标孔隙率(φ_{tar}), d_f 以及材料内纤维的空间分布参数(α_1, α_2),通过方向向量算法控制纤维取向,具体过程详见2.3节。

(4)基于随机纤维生成程序,在计算域内随机生成纤维中心点坐标,随后根据纤维直径和方向向量生成圆柱体体素单元,通过迭代优化避免纤维交叉穿透,最终生成代表性单元(RVE)。

笔者采用虚拟生成技术构建纤维集合体模型时,主要通过设定 d_f, φ 及纤维空间分布等几何参数

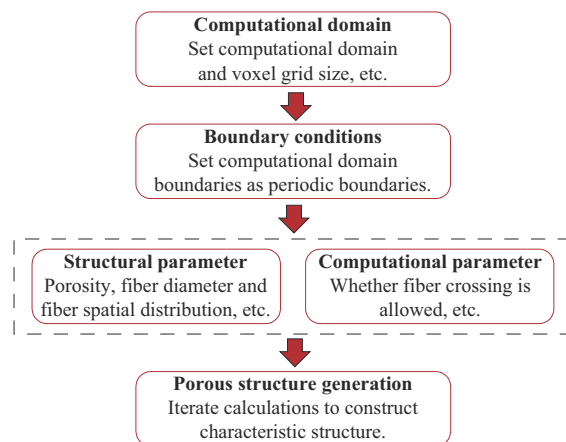


图2 增强层材料孔隙结构建模流程

Fig. 2 Modeling process for porous structure of reinforcement layer materials

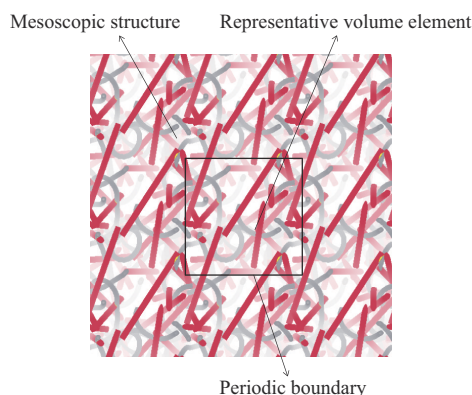


图3 代表性单元与周期边界

Fig. 3 Representative unit and periodic boundary

表征材料结构特征。对于材质因素,由于水蒸气在纤维多孔介质中的扩散主要受孔隙结构影响,因此仿真中默认纤维材质为惰性介质,未考虑表面吸附等化学作用。若需进一步探究材质极性、表面能等因素的影响,可在后续研究中引入分子动力学模拟或修正扩散系数。

1.2 气密膜增强层细观尺度透湿模型

气密膜增强层材料内的水蒸气传递过程主要为扩散传质,气相流体的流动形态与孔隙尺寸密切相关。根据克努森数(Kn),可将气体流态分为连续介质流、滑移流、过渡流与分子自由流,其数学表达式见式(1)。

$$Kn = \lambda/d \quad (1)$$

式中: λ 为分子平均自由程; d 为孔隙尺寸。

具体流态对应的扩散机制如下:当流体处于连续流时($0 < Kn \leq 0.001$),水蒸气扩散机制为菲克扩散,即体积扩散;当流态进入滑移流范围($0.001 < Kn \leq 0.1$),孔隙对气体分子的吸附作用开始显著增强;当

流态为过渡流时($0.1 < Kn \leq 10$)时,水蒸气由菲克扩散转变为过渡区扩散;当流态处于分子自由流时($Kn > 10$),一般采用微观方法进行求解,水蒸气遵循克努森扩散机制。

本研究中,无纺布材料的 φ 较高,孔隙尺寸处于几十到数百微米量级,材料内流体处于连续流状态($0 < Kn \leq 0.001$),水蒸气在材料内的输运主要通过膜两侧的浓度差进行驱动,该过程可以通过菲克定律进行描述,见式(2)、式(3)。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla c) \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = -D \nabla c \quad (3)$$

式中: c 为水蒸气的物质的量浓度,单位为 mol/m^3 ; t 为时间,单位为 s ; ∇ 为梯度算子; D 为扩散系数,其值取决于温度、压力、介质的性质以及扩散物种的性质,单位为 m^2/s ; $\mathbf{J}$ 为扩散通量,单位为 $\text{mol/m}^2/\text{s}$ 。

本研究中的仿真采用稳态扩散条件(浓度梯度恒定),式(2)可简化为式(4)。

$$\nabla \cdot (D \nabla c) = 0 \quad (4)$$

计算域进/出口位置的水蒸气浓度设为第一类边界条件(定值条件),设定进口浓度(c_{inlet})为 1 mol/m^3 ,出口浓度(c_{out})为 0 mol/m^3 ,其余面采用周期性边界条件,壁面(纤维表面)设为无滑移边界,采用LIR求解器求解矩阵方程。

上述研究在结构模型上细致描述了材料内的孔隙形貌,属于孔隙尺度问题;在求解方法方面,由于流体连续性假设依然成立,因此相关的CFD仿真属于连续尺度研究范畴。

2 结果与讨论

为探索增强层孔隙结构与材料透湿性能间的构效关系,通过仿真分析 φ 、 d_f 、纤维空间分布规律等因素对透湿性能的影响。调研增强层(水刺无纺布)常用纤维材料及纤维直径等信息^[23-25],结果表明,水刺无纺布中的纤维尺度普遍为微米级,因此设定基础仿真算例 d_f 为 $20 \mu\text{m}$, φ 为70%,采用连续直纤维构建代表性单元,计算域尺寸为 $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$,纤维在计算域内各向同性随机分布,增强层两侧浓度差设定为 1 mol/m^3 ,水蒸气在空气中的扩散系数为 $2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

2.1 φ 对无纺布增强层透湿性能的影响

在基础算例的基础上,改变 φ (50%~90%),部分材料的细观尺度模型如图4所示,图4b所示结构为

基础算例。

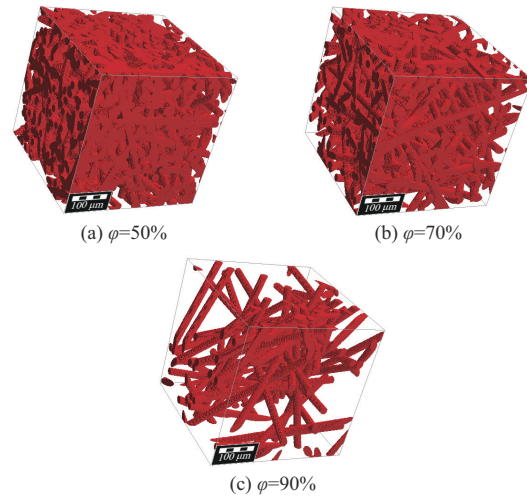


图4 不同 φ 增强层的细观尺度结构

Fig. 4 Mesoscopic structures of reinforcement layers with varied φ

图5为增强层材料沿厚度方向(Z 轴方向)中心截面位置(XY 平面, $z=250 \mu\text{m}$)的水蒸气浓度分布情况,可以看出,随着 φ 的增加,材料内纤维数目减少,固相材料对水蒸气浓度分布的影响减弱,水蒸气浓度接近线性梯度分布。

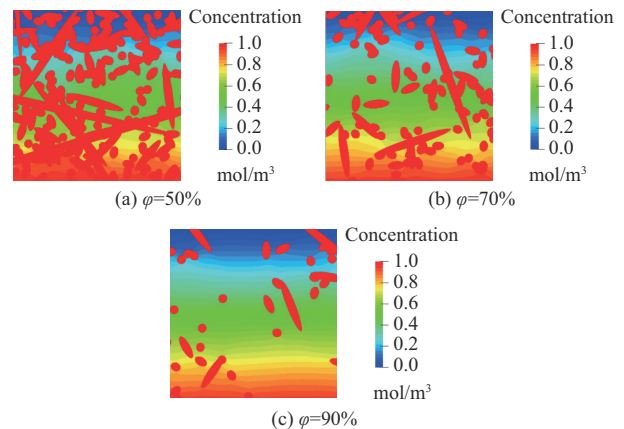


图5 不同 φ 增强层厚度方向的水蒸气分布

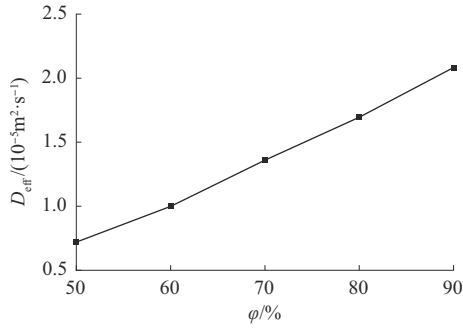
Fig. 5 Thickness-directional water vapor distribution in reinforcement layers with varied φ

材料厚度方向的 D_{eff} 通过菲克定律一维公式计算,见式(5):

$$D_{\text{eff}} = \frac{J_z \cdot L_z}{\Delta c} \quad (5)$$

式中: J_z 为材料 Z 轴方向上的扩散通量,单位为 $\text{mol}/(\text{m}^2/\text{s})$; L_z 为材料厚度,单位为 m ; Δc 为计算域进/出口间的水蒸气浓度差,单位为 mol/m^3 。

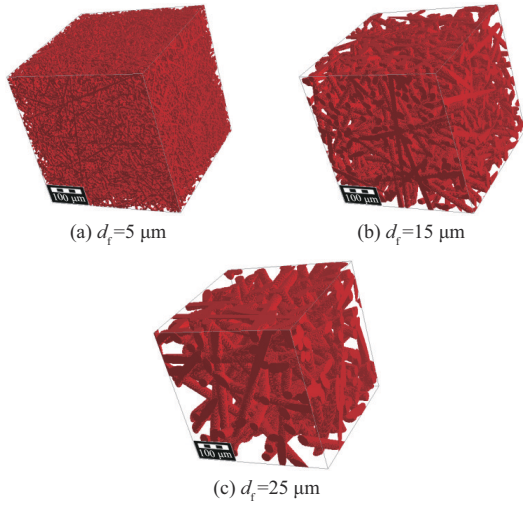
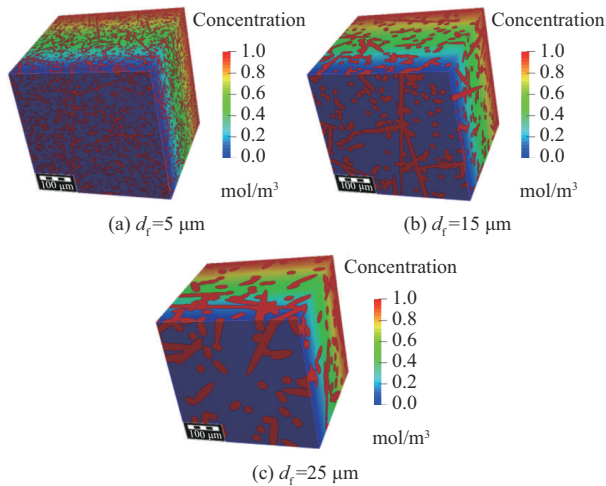
图6为增强层材料的水蒸气 D_{eff} 随 φ 的变化。由图6可见,随着材料 φ 的增大,水蒸气的扩散阻力降低, D_{eff} 呈线性增长规律。

图6 水蒸气的 D_{eff} 随 ϕ 的变化Fig. 6 Variation of D_{eff} of water vapor with ϕ

2.2 d_f 对无纺布增强层透湿性能的影响

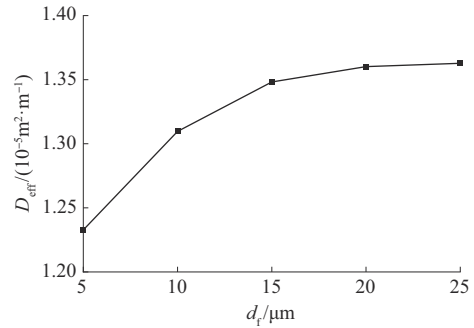
在基础算例的基础上,改变 d_f , d_f 变化范围为5~25 μm ,部分无纺布增强层的细观尺度模型如图7所示。

图8给出增强层材料内的水蒸气浓度分布情

图7 d_f 不同的增强层的细观尺度结构Fig. 7 Mesoscopic structures of reinforcement layers with varied d_f 图8 不同 d_f 增强层的水蒸气分布Fig. 8 Water vapor distribution in reinforcement layers with varied d_f

况,分析仿真结果可知,在 ϕ 一定的情况下, d_f 的变化对水蒸气的空间分布影响较小。

图9显示了材料的水蒸气 D_{eff} 随 d_f 的变化,研究表明,当 d_f 较小时,单位体积内纤维数量较多,水蒸气扩散通路受到堵塞,导致材料的 D_{eff} 相对较小。当 d_f 从5 μm 增大至20 μm 时,单位体积内纤维数量减少,固相对水蒸气的阻塞效果减弱, D_{eff} 从 $1.23 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 增至 $1.36 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$,当 d_f 超过20 μm 后,固相所引起的水蒸气堵塞效应影响微弱, D_{eff} 趋于稳定。

图9 水蒸气的 D_{eff} 随 d_f 的变化Fig. 9 Variation of D_{eff} of water vapor with d_f

2.3 纤维空间分布对无纺布增强层透湿性能的影响

在进行膜材料开发时,为满足一定的功能,会对其内部纤维的空间分布进行特殊设计,形成各向异性分布特性,因此,需要考察增强层内纤维分布形式对透湿性能的影响。

在生成纤维过程中,单根纤维的方向可以表示为 x, y, z ,分别为纤维在三维空间中的单位向量分量。为实现纤维的空间各向异性分布,定义参数 α_1 与 α_2 ,按式(6)调整纤维的方向向量^[26]。

$$d_\alpha = \begin{pmatrix} x_\alpha \\ y_\alpha \\ z_\alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 \cdot x \\ \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot y \\ z \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中: d_α 为纤维的方向向量, x_α, y_α 与 z_α 代表 d_α 的向量分量。进行归一化后得到的纤维的单位方向向量 d_n 见式(7)。

$$d_n = \frac{1}{\sqrt{(\alpha_1 x)^2 + (\alpha_1 \alpha_2 y)^2 + z^2}} \begin{pmatrix} \alpha_1 x \\ \alpha_1 \alpha_2 y \\ z \end{pmatrix} \quad (7)$$

在归一化之前, α_1 控制 x 与 y 方向坐标,而 α_2 仅影响 y 方向坐标,它们均不改变 z 方向坐标。归一化之后, α_1 与 α_2 对笛卡尔坐标系下的三个坐标方向均有影响。较高的 α_1 值会导致纤维平行于 XY 平面,而

较高的 α_2 值会使纤维朝向 Y 方向。设定较低的 α_1 值可以获得朝向 Z 方向的纤维,而设定较低的 α_2 值则会使纤维平行于 XZ 平面,通过对以上两个参数的控制,可以实现不同形式的纤维各向异性分布特征。

对基础算例进行修改,分别建立四个各向异性算例,设定 $\alpha_2 = 1$ 为恒定值,而 α_1 的取值范围为0.1~10,生成的纤维分布形式见图10。从图中可以看出,case 1与case 2中纤维主要在 XY 平面内呈堆叠形式,case 3与case 4中纤维主要在 XZ 平面内呈现堆叠形式,其中 Z 轴为材料厚度方向。

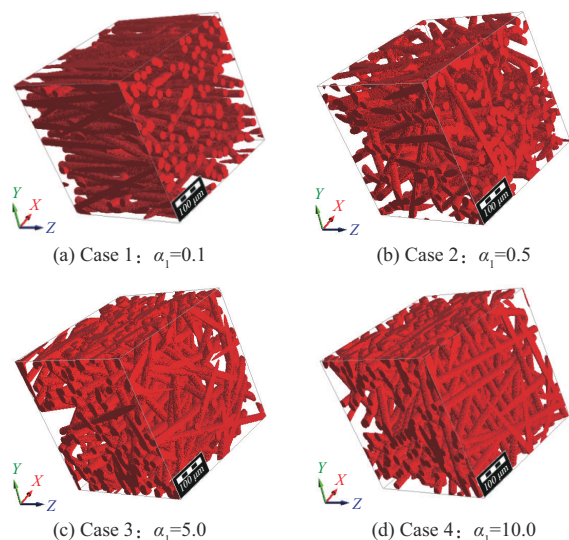


图10 纤维分布对增强层细观尺度结构的影响

Fig. 10 Influence of fiber distribution on mesoscopic structure of reinforcement layer

图11给出各向异性材料内沿厚度方向的水蒸气浓度分布情况,可与图5b中的基础算例(纤维各向同性分布)仿真结果进行对比,图中可以清晰地看到沿材料厚度方向纤维分布规律的不同。图12

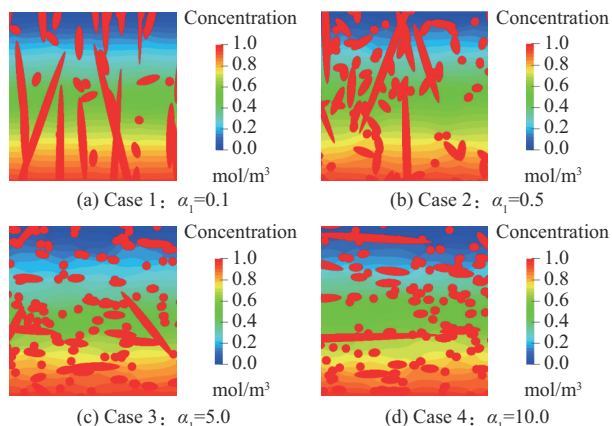


图11 不同纤维分布增强层厚度方向的水蒸气分布

Fig. 11 Thickness-directional water vapor distribution in reinforcement layers with varied fiber distributions

绘制了增强层 D_{eff} 随 α_1 值的变化,研究结果表明,随着 α_1 值的增大,水蒸气输运方向更接近于垂直纤维法向,扩散阻力增大, D_{eff} 减小,当各向异性参数 α_1 从0.1增至10时,水蒸气沿材料厚度方向的扩散阻力增大约27%。可以看出,纤维的空间分布形式,即各向异性特征对材料的透湿性能影响显著。

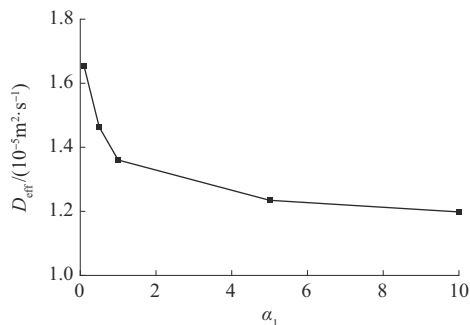


图12 水蒸气 D_{eff} 随纤维分布的变化

Fig. 12 Variation of D_{eff} of water vapor with fiber distributions

3 结论

针对气密膜增强层材料(水刺无纺布材料)进行细观尺度建模与透湿性能仿真,揭示了材料内部结构参数如 φ , d_f 及纤维空间分布形式对水蒸气 D_{eff} 的影响,获得了以下结论:

(1)随着增强层材料 φ 的增加,等体积空间内的纤维数目减少,固相材料对水蒸气浓度分布的影响减弱,材料的 φ 与 D_{eff} 呈线性正相关;

(2)纤维尺寸的变化对水蒸气的空间分布情况影响较小,当 d_f 较小时,单位体积内纤维数量较多,水蒸气扩散通路受到堵塞,导致材料 D_{eff} 相对较小,当 d_f 从5 μm 增大至20 μm 时, D_{eff} 从 $1.23 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 增至 $1.36 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$,当 d_f 超过20 μm 后, D_{eff} 趋于稳定;

(3)纤维的空间分布形式,即各向异性特征对材料的透湿性能影响显著。随着空间分布参数 α_1 值的增大,水蒸气输运方向更接近于垂直纤维法向,扩散阻力增大, D_{eff} 减小,当各向异性参数 α_1 从0.1增至10时,水蒸气沿材料厚度方向的扩散阻力增大约27%。

本研究为气密膜增强层材料的结构设计和性能优化提供了理论依据和数据支持,对于提高建筑节能效果具有现实意义。未来的研究可以进一步结合实验,探索不同材料组合方式和环境条件下的透湿性能,进而开发更高效的气密膜材料。

参考文献

[1] 轩莉,何东亮,余海洋,等.装配式建筑保温一体化预制外墙防水

- 技术[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊2): 1 636–1 639.
- XUAN Li, HE Dongliang, YU Haiyang, et al. Waterproof technology of prefabricated external wall integrated with prefabricated building thermal insulation[J]. Building Structure, 2022, 52(S2): 1 636–1 639.
- [2] 蔡倩, 陈蕾, 王长军, 等. 近零能耗建筑热桥的影响因素分析[J]. 建筑节能(中英文), 2025, 53(5): 53–59, 67.
- CAI Qian, CHEN Lei, WANG Changjun, et al. Analysis of influence factors on thermal bridge of nearly zero energy building[J]. Building Energy Efficiency, 2025, 53(5): 53–59, 67.
- [3] 于建勋, 马帅, 李锋, 等. 超低能耗建筑设计管理要点研究[J]. 建筑科学, 2022, 38(12): 234–240.
- YU Jianxun, MA Shuai, LI Feng, et al. Study on design management essentials of ultra-low energy buildings[J]. Building Science, 2022, 38(12): 234–240.
- [4] 石莹, 孙立新, 姜召彩. 热湿作用下建筑外保温系统的安全问题与关键构造层设计[J]. 建筑节能(中英文), 2022, 50(4): 15–19.
- SHI Ying, SUN Lixin, JIANG Zhaocai. Safety and key construction layer design of external thermal insulation system under hygro-thermal performance[J]. Building Energy Efficiency, 2022, 50(4): 15–19.
- [5] 杨辉, 匡宁, 朱立平, 等. 我国极寒地区超低能耗建筑气密性膜材料应用与评价[J]. 建设科技, 2024(13): 43–45.
- YANG Hui, KUANG Ning, ZHU Liping, et al. Application and evaluation of airtight membrane materials for ultra-low energy building in extremely cold regions of China[J]. Construction Science and Technology, 2024(13): 43–45.
- [6] 周文. 基于绿色溶剂的纳米纤维材料的构筑及其防水透湿性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.
- ZHOU Wen. Construction of green-solvent-based nanofibers and investigation of their waterproof and breathable performance[D]. Shanghai: Donghua University, 2022.
- [7] 张慧慧, 刘茜, 胡东兴, 等. 聚(苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯)基防水透气膜的性能及其复合应用[J]. 塑料工业, 2025, 53(3): 158–164.
- ZHANG Huihui, LIU Qian, HU Dongxing, et al. Performances and Composite Applications of Waterproof and Breathable Membranes based on Poly(styrene ethylene butene styrene)[J]. China Plastics Industry, 2025, 53(3): 158–164.
- [8] 张静贤, 陈小卫, 张大华. 无溶剂聚氨酯防水透湿膜的制备及性能研究[J]. 聚氨酯工业, 2024, 39(4): 31–34.
- ZHANG Jingxian, CHEN Xiaowei, ZHANG Dahua. Preparation and performance of solvent-free waterproof and breathable polyurethane membrane[J]. Polyurethane Industry, 2024, 39(4): 31–34.
- [9] SALOMOV U R, CHIAVAZZO E, ASINARI P. Pore-scale modeling of fluid flow through gas diffusion and catalyst layers for high temperature proton exchange membrane (HT-PEM) fuel cells[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2014, 67(2): 393–411.
- [10] ZHU R, HUANG Y W, YU Q F, et al. *In-situ* electric swing adsorption enabling superior water vapor capture of salt-based carbon fibers[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(4). DOI: 10.1016/j.jece.2024.113070.
- [11] HOU B, LU Y W, ZUO C, et al. Study on water vapor permeation model of nanofiber dehumidification membrane based on lattice Boltzmann method[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2025, 166. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109178.
- [12] YAMAMOTO H, OGURA D. Prediction of water vapor permeation and desiccant saturation in vacuum insulation panels with a glass fiber core[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76. DOI: 10.1016/j.job.2023.107347.
- [13] WANG Y Y, LIU Y F, WANG D J, et al. Effect of the night ventilation rate on the indoor environment and air-conditioning load while considering wall inner surface moisture transfer[J]. Energy and Buildings, 2014, 80: 366–374.
- [14] WANG Y Y, FAN Y, WANG D J, et al. The effect of moisture transfer on the inner surface thermal performance and the thermal transmittance of the roof-wall corner building node in high-temperature and high-humidity areas[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44. DOI: 10.1016/j.job.2021.102949.
- [15] MOGHADAM A, YOUSEFI S H, TAFRESHI H V, et al. Characterizing nonwoven materials *via* realistic microstructural modeling[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 211: 602–609.
- [16] CAO B W, WANG S L, DONG W, et al. Investigation of the filtration performance for fibrous media: Coupling of a semi-analytical model with CFD on Voronoi-based microstructure[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 251. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.117364.
- [17] WANG Q, MAZE B, VAHEDI TAFRESHI H, et al. Simulating through-plane permeability of fibrous materials with different fiber lengths[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2007, 15(8): 855–868.
- [18] VAHEDI TAFRESHI H, A RAHMAN M S, JAGANATHAN S, et al. Analytical expressions for predicting permeability of bimodal fibrous porous media[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(6): 1 154–1 159.
- [19] SAFI M A, PRASIANAKIS N I, MANTZARAS J, et al. Experimental and pore-level numerical investigation of water evaporation in gas diffusion layers of polymer electrolyte fuel cells[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 238–249.
- [20] SAFI M A, MANTZARAS J, PRASIANAKIS N I, et al. A pore-level direct numerical investigation of water evaporation characteristics under air and hydrogen in the gas diffusion layers of polymer electrolyte fuel cells[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 129: 1 250–1 262.
- [21] NI L, CHEN Z F, MUKHOPADHYAYA P, et al. Numerical simulation on thermal performance of vacuum insulation panels with fiber/powder porous media based on CFD method[J]. Interna-

- tional Journal of Thermal Sciences, 2022, 172. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107320.
- [22] SHIRZADI M, FUKASAWA T, FUKUI K, et al. Application of deep learning neural networks for the analysis of fluid-particle dynamics in fibrous filters[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 455. DOI:10.1016/j.cej.2022.140775.
- [23] 庞水全. 基于扫描电子显微镜的微结构特征尺寸测量方法研究[D]. 广州:华南理工大学, 2022.
- PANG Shuiquan. Research on measurement method of microstructure feature size based on scanning electron microscope[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2022.
- [24] WANG H, GUO J J, XIE L Y. Preparation of lotus fibre nonwoven composite fabrics by spunlacing process[J]. Materials Letters, 2022, 326. DOI:10.1016/j.matlet.2022.132940.
- [25] ZHANG L, NI R Y, SHI H, et al. Hierarchically fibrillated spunlaced nonwovens from waste wool supported ionic liquid as solid amine adsorbents for CO₂ capture[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 357. DOI:10.1016/j.seppur.2024.130025.
- [26] HILDEN J, RIEF S, PLANAS B. GeoDict 2023 User Guide. FiberGeo handbook[M]. Germany:Math2Market GmbH, 2023.
-
- (上接第43页)
- [7] YANG M, RUI L, LU Y H, et al. Sustainable utilization of leather wastes: A novel waterborne polyurethane-reinforced collagen hydrolysate-based functional paper internal sizing agent[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2022, 10(32): 10 752 – 10 759.
- [8] GHASEMI S, GHEZELSOFFLOO M, NAEIMI M, et al. Isocyanate-free urethane modified vinyl ester resin: Synthesis, characterization and mechanical properties[J]. Polymer International, 2022, 71(11):1 295–1 307.
- [9] IDREES M, YOON H, PALMESE G R, et al. Engineering toughness in a brittle vinyl ester resin using urethane acrylate for additive manufacturing[J]. Polymers, 2023, 15(17). DOI: 10.3390/polym15173501.
- [10] 孙昭宜, 李瑜, 邓金飞, 等. 聚氨酯/乙烯基树脂 IPN 阻尼材料的制备与表征[J]. 热固性树脂, 2020, 35(6):43–48.
- SUN Zhaoyi, LI Yu, DENG Jinfei, et al. Preparation and characterization of polyurethane/vinyl resin IPN damping materials[J]. Thermosetting Resin, 2020, 35(6):43–48.
- [11] 白国栋, 刘焯, 管涌, 等. 聚氨酯丙烯酸酯增韧改性乙烯基酯树脂[J]. 复合材料科学与工程, 2020(11):87–92.
- BAI Guodong, LIU Ye, GUAN Yong, et al. Toughening modification of vinyl ester resin by polyurethane acrylate[J]. Composites Science and Engineering, 2020(11):87–92.
- [12] 杨瑞瑞, 王雅婷, 冉晓璐, 等. 硅烷改性氧化石墨增韧乙烯基酯树脂[J]. 复合材料科学与工程, 2025(2):82–90.
- YANG Ruirui, WANG Yating, RAN Xiaolu, et al. Toughening vinyl ester resin by silane-modified graphene oxide[J]. Composites Science and Engineering, 2025(2):82–90.
- [13] 彭新龙. 玻璃纤维对乙烯基酯复合材料层间性能的影响[J]. 热固性树脂, 2023, 38(3):49–54.
- PENG Xinlong. Effect of glass fiber on the interlaminar properties of vinyl ester composites[J]. Thermosetting Resin, 2023, 38(3):49–54.
- [14] 疏红扬, 季承远, 韩田琛, 等. 热塑性聚氨酯/甲基乙烯基硅橡胶共混物性能的研究[J]. 橡胶科技, 2019, 17(1):16–20.
- SHU Hongyang, JI Chengyuan, HAN Tianchen, et al. Properties of thermoplastic polyurethane/methyl vinyl silicone rubber blends [J]. Rubber Science and Technology, 2019, 17(1):16–20.
- [15] 吴艳玲, 周强, 罗清元, 等. 基于动态键的自修复聚氨酯弹性体材料的研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(增刊2):558–571.
- WU Yanling, ZHOU Qiang, LUO Qingyuan, et al. Research progress of self-repairing polyurethane elastomer based on dynamic bond[J]. Materials Reports, 2024, 38(Suppl 2):558–571.
- [16] YANG Y, LI R X, GAO C T, et al. Impact-resistant, high-toughness, self-healable elastomers with physical-chemical dual-crosslinking networks for efficient energy absorption[J]. Applied Materials Today, 2024, 41. DOI:10.1016/j.apmt.2024.102522.