

针刺非织造滤材受压状态结构与透气性的原位数值预测

葛慧敏¹ 晏渝海¹ 杜敏¹ 宋宇^{1,2}

1. 东华大学 a. 纺织学院, b. 产业用纺织品教育部工程研究中心, 上海 201620;
2. 滨州魏桥国科高等技术研究院, 山东 滨州 256606

摘要: 纤维基非织造滤材极易因受压变形而改变结构特性和过滤性能, 其压缩回弹性使相关研究工作开展困难, 目前亟需开展非织造滤材受压状态结构与透气性的预测研究。选取针刺非织造滤材, 借助同步辐射 X 射线计算机断层扫描技术, 重建反映滤材真实结构的三维模型, 进一步通过原位压缩模拟获取处于不同压缩率的滤材模型, 并结合试验表征测试结果开展滤材孔隙结构和透气性预测。研究发现, 针刺非织造滤材在压缩过程中, 大孔孔径 (D_{90}) 快速下降, 而中孔孔径 (D_{50}) 和小孔孔径 (D_{10}) 则平缓降低。此外, 气流场演化过程表明, 压缩作用导致的滤材结构致密化及大孔孔径下降, 阻碍了气流通过, 造成了透气率下降和过滤阻力增加。

关键词: 非织造滤材; 受压状态; 透气性; 数值模拟; X 射线计算机断层扫描

中图分类号: TS 174.5

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2025)10-0020-07

In-situ numerical prediction of structure and air permeability of needle-punched nonwoven filter media at compressed state

Ge Huimin¹, Yan Yuhai¹, Du Min¹, Song Yu^{1,2}

1. a. College of Textiles, b. Engineering Research Center of Technical Textile, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China;
2. Binzhou Institute of Technology, Weiqiao-UCAS Science and Technology Park, Binzhou 256606, Shandong, China

Abstract: Fibrous nonwoven filter media are prone to being compressed, thus affecting their structural characteristics and filtration properties. Due to the compression resilience, it is difficult to conduct related studies. Currently, it is urgent to investigate the prediction of structure and air permeability performance of nonwoven filter media at compressed state. In this study, needle-punched nonwoven filter medias were selected, and their 3D structural models were reconstructed using synchrotron radiation X-ray computed tomography. Further predictions of filter media pore structure and air permeability were conducted by simulating different compression ratios through *in-situ* compression modeling, combined with experimental characterization test results. The study discovered that during the compression process, the large pore diameter (D_{90}) decreased rapidly, while the medium pore diameter (D_{50}) and small pore diameter (D_{10}) decreased gently. In addition,

基金项目: 上海市启明星项目扬帆专项(23YF1400600); 教育部产学研合作协同育人项目(BINTECH-PY-20231124-45); 中央高校基本科研业务费专项资金(2232025D-11); 上海同步辐射光源普通课题(2024-SSRF-PT-510551, 2022-SSRF-PT-020359)

收稿日期: 2025-04-21

作者简介: 葛慧敏, 女, 2000 年生, 在读硕士研究生, 研究方向为非织造材料空气过滤性能的数值模拟

通信作者: 宋宇, 讲师, 研究方向为非织造空气过滤材料, songyu@dhu.edu.cn

the microscale airflow field indicated that compression-induced densification of the filter structure and reduced diameter of large pores, blocked the airflow, resulting in reduced air permeability and increased pressure drop.

Keywords: nonwoven filter media; compressed state; air permeability; numerical simulation; X-ray computed tomography

非织造滤材是用于空气过滤以获取洁净空气的基础物资。作为由纤维堆叠后缠结或固结而成的纤维集合体,非织造滤材往往具有柔性特点,受压易产生形变^[1],而这也将会改变滤材的过滤特性。此外,也有关于过滤压缩气体时,高压工况对玻纤滤材造成不可逆压缩及结构性能改变的报道^[2]。因此,研究非织造滤材在受压状态下的结构与性能变化,对于常压和高压空气过滤均具有十分重要的意义。

尽管非织造滤材具有压缩回弹性,但其极易产生压缩形变,因此在维持形变状态不发生改变时对其开展研究仍具挑战性。已有研究人员分别采用了试验压缩、理论分析和数值模拟的方法,探究纤维材料的压缩性与其结构性能的关系。Jaganathan 等^[1]将滤材包埋在树脂中,借助三维数字体积成像方法获取了不同压缩率滤材的三维模型,并解析了其孔径演化规律。令狐彩^[3]搭建了试验压缩装置,将玻纤滤材压缩至特定压缩率,待结构稳定后开展结构分析与过滤性能测试。Mercier 等^[4]针对压缩形变状态驻极非织造空气过滤介质的性能变化问题,建立了过滤效率理论分析模型。吴帆等^[5-6]建立了棉织物的纤维结合体模型,并开展了有限元压缩过程仿真。Chang 等^[7]借助随机算法,生成了不同压缩率的滤材结构参数所对应的三维模型,并针对这些滤材模型进行过滤性能的数值模拟。然而,上述研究方法也面临挑战,如试验研究虽能建立宏观结构性能关系,但不能阐明微观气流/气固两相流动机制;理论分析需大量试验验证以明确其普适性;数值模拟方法依赖材料模型的精准构建与物理过程的精准模拟。因此,亟需建立探究纤维基过滤材料受压状态结构性能的新方法。

本文作者在前期研究中借助 X 射线计算机断层扫描技术获取了滤材结构的三维模型^[8],也据此开展了高精度气流作用模拟^[9]和过滤性能计算^[10],有望为上述问题提供解决方案。本文将针刺非织

造滤材为研究对象,借助上海同步辐射光源 X 射线成像装置,重建真实的针刺非织造滤材三维模型,进一步展开原位压缩模拟,并结合试验表征测试结果,对滤材受压状态结构与透气性进行数值模拟预测。本文采用三维成像结合数值模拟的方法,对非织造滤材受压状态结构性能预测的可行性进行分析,探究非织造滤材结构和透气性在受压下的演化规律,为后续非织造滤材在实际压缩形变工况下的性能预测和针对性滤材结构的设计与开发,提供指导方法与参考依据。

1 试验

1.1 材料和仪器

试验用针刺非织造滤材试样由 0.222 tex 和 0.156 tex 涤纶纤维以 60/40 的质量比混合后制成,所用试验材料均由江苏东方滤袋有限公司提供。

针刺非织造滤材表征测试、图像处理和数值模拟用仪器及软件如表 1 所示。

表 1 试验用仪器及软件

Tab. 1 Test instruments and software

仪器	供应商
FLEX 1000 型扫描电子显微镜	日本日立公司
CFP-1100AI 型孔径分析仪	美国 PMI 公司
YG461E 型全自动织物透气仪	温州方圆仪器有限公司
8130 型自动滤料测试仪	美国 TSI 公司
PITRE 软件	中国科学院上海应用物理研究所
Avizo 软件	美国赛默飞世尔科技公司
GeoDict 软件	德国 Math2Market 公司

1.2 滤材结构与性能表征测试

采用 FLEX 1000 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察针刺非织造滤材的正反面,并分别拍摄 5 张 SEM 照片,随后导入 ImageJ 软件测量涤纶纤维直径及分布。

参照 GB/T 2679.14—1996《过滤纸和纸板最大

孔径的测定》,采用 Galwick™ 浸润液将滤材试样润湿,然后采用 CFP-1100AI 型孔径分析仪测量针刺非织造滤材的孔径及分布,共测试 3 个试样。

参照 GB/T 5453—1997《纺织品 织物透气性的测定》,采用 YG461E 型全自动织物透气仪测试针刺非织造滤材透气性,测试压降为 100 Pa,测试面积为 20 cm²,共测试 10 次。同时,使用 8130 型自动滤料测试仪测试针刺非织造滤材在 70 L/min 流量下的过滤阻力,测试面积为 100 cm²,共测试 3 个试样。

1.3 针刺非织造滤材三维模型的建立及数值模拟

1.3.1 针刺非织造滤材三维扫描与图像处理

借助上海同步辐射光源 BL13HB 光束线站(X 射线成像及生物学应用光束线试验站),对针刺非织造滤材进行 X 射线微米级计算机断层扫描(X-ray micro-computed tomography, X-ray μ -CT)。扫描所涉及的参数有:体素尺寸为 1.625 μ m,扫描视域为 2 048 μ m \times 2 048 μ m \times 2 048 μ m,光强为 15 keV,试样与探测器间的距离为 0.1 m。在对试样进行 180° 旋转的过程中,采集 1 080 张投影图像,每张投影的曝光时间为 0.6 s,总扫描时间约为 15 min。

使用 PITRE 软件将系列投影图像重构为单张图像切片,共转换图像切片 2 048 张。随后使用 Avizo 软件将系列图像切片重构为针刺非织造滤

材三维模型,其图像处理流程见作者前期研究^[8]。

1.3.2 针刺非织造滤材受压过程的原位模拟与结构性能分析

采用 GeoDict 软件中的 ElastoDict 模块及植入的 FeelMath-LD 求解器^[11]对针刺非织造滤材三维模型进行原位压缩模拟,设置压缩率分别为 10%、25%、50%。大规模非线性几何结构形变需在受压状态下根据设置的压缩率点位依次计算。计算时,设置循环边界条件以加速模拟计算。

使用 MatDict 模块分析针刺非织造滤材三维模型的面密度。采用 PoroDict 模块分析孔隙结构,其中的 Porosimetry 功能可模拟孔径及分布测试。同时,采用 FlowDict 模块进行原位气流作用模拟,分析针刺非织造滤材内部的气流场分布。

2 结果与讨论

2.1 针刺非织造滤材结构与透气性分析

试验所用针刺非织造滤材的结构表征如图 1。经测试,针刺非织造滤材的平均纤维直径为(13.22 \pm 0.71) μ m,面密度为(124.97 \pm 6.75) g/m²,厚度为(3 915.7 \pm 165.3) μ m。经计算,针刺非织造滤材的孔隙率为(97.67 \pm 0.13)%,平均孔径为(73.53 \pm 9.29) μ m,透气率为(1 365.43 \pm 122.41) mm/s。

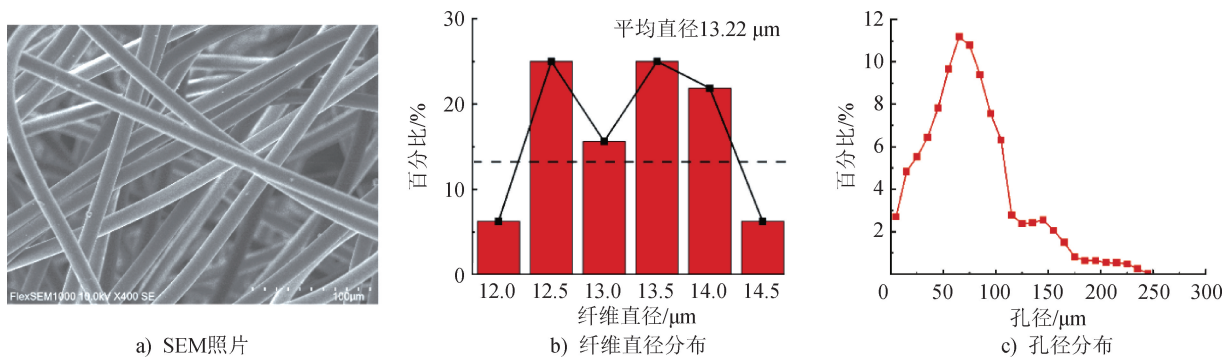


图1 针刺非织造滤材结构表征

Fig. 1 Structure characterization of needle-punched nonwoven filter media

2.2 针刺非织造滤材三维模型的建立

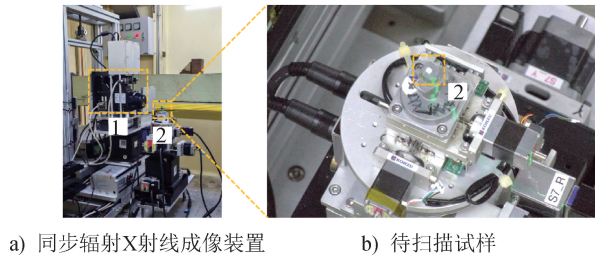
2.2.1 同步辐射 X 射线计算机断层扫描

上海同步辐射光源 BL13HB 光束线站的 X 射线成像装置如图 2a)所示。将针刺非织造滤材裁剪为边长为 3 mm 的正方形样品,并使用双面胶固定于载具上[图 2b)]。需保证待扫描试样尺寸大于扫

描视域,并在扫描前校准试样位置,从而确保对试样中心位置进行无损扫描,具体扫描参数见 1.3.1 节。

2.2.2 图像切片重构

将扫描投影图像[图 3a)]导入 PITRE 软件后,对其进行相位恢复处理,以获得同轴投影图中的相位信息。然后,在软件中输入扫描过程中使用的参



1—X 射线接收器;2—待扫描样品。
图 2 同步辐射 X 射线成像装置及试样
Fig. 2 Synchrotron radiation X-ray imaging facility and test sample

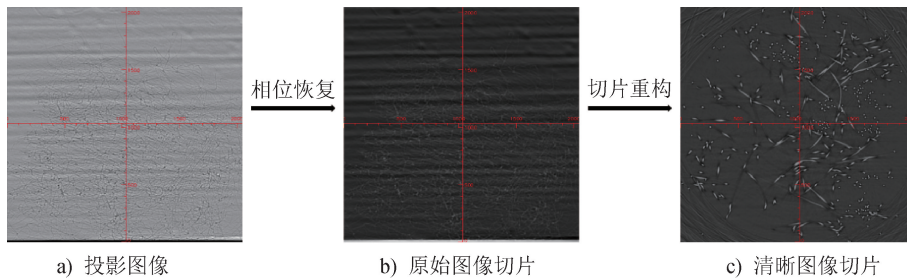


图 3 图像切片重构流程
Fig. 3 Image slice reconstruction process

示。将系列图像切片(图 4a)导入 Avizo 软件,同步对所有切片进行图像处理,包括降噪、裁剪和分割。以单张图像切片(图 4b)为例,首先采用中值滤波器进行降噪处理,获取背景噪声降低的图像切片(图 4c)。然后裁剪图像以去除其中与针刺非织造滤材无关的部分(如图 4c 边角的纯空气

数信息,如光强及空间分辨率等,随后通过调整 δ/β 值(材料的相位衰减二重性),获得成像质量相对更好的投影图像[图 3b]。最后,将完成相位恢复的投影图进行切片重构,在软件中选择 Gridrec 切片重构算法和 shepp 滤波器,将旋转中心模式设置为 Static、数值设置为 1011,最终获得图像清晰度较高的图像切片[图 3c],将其用于针刺非织造滤材三维模型重建。

2. 2. 3 针刺非织造滤材三维模型重建

针刺非织造滤材三维模型重建过程如图 4 所

区域),最终获得三维尺寸为 $2\ 028\ \mu\text{m} \times 2\ 028\ \mu\text{m} \times 2\ 925\ \mu\text{m}$ 的图像切片(图 4d)。最后,借助 Avizo 软件中的阈值工具选中图像中的纤维部分(图 4e),从而实现纤维与孔隙的有效分割。分割后的系列图像切片经体积渲染后可得滤材三维模型(图 4f)。

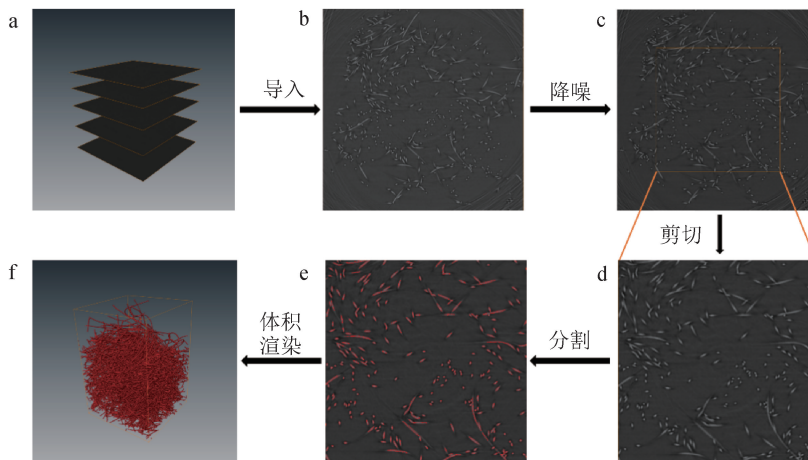


图 4 针刺非织造滤材三维模型重建流程
a—系列图像切片;b—单张图像切片;c—降噪后的图像切片;d—尺寸裁剪后的图像切片;e—分割后的图像切片(红色部分为涤纶纤维);f—针刺非织造滤材三维模型。

图 4 针刺非织造滤材三维模型重建流程
Fig. 4 Reconstruction process of needle-punched nonwoven filter media 3D structural model

2.3 针刺非织造滤材原位压缩模拟及其结构与透气性演化

2.3.1 针刺非织造滤材静态三维模型代表性验证

由于后续在 GeoDict 软件中进行性能数值模拟耗时较长,为节省模拟计算时间,首先对针刺非织造滤材模型(三维尺寸为 $2\,028\ \mu\text{m}\times 2\,028\ \mu\text{m}\times 2\,925\ \mu\text{m}$)在 X-Y 平面上的尺寸进行了裁剪,也裁剪了厚度方向表面的 2 个空气层,获得三维尺寸为 $975\ \mu\text{m}\times 975\ \mu\text{m}\times 2\,317.25\ \mu\text{m}$ 的新模型;再借助 GeoDict 软件中 ProcessGeo 模块的 Rescale 功能,将体素尺寸扩大为原模型体素尺寸的 2 倍(即 $3.25\ \mu\text{m}$),得到体素数减少至原模型的 1/8 但尺寸不变的三维模型。

将针刺非织造滤材三维模型导入 GeoDict 软件,并进行结构与性能的分析,其各项参数与试验测试值的对比如表 2 所示。通过对比可发现,针刺非织造滤材三维模型的面密度、孔隙率与平均孔径,都与实际针刺非织造滤材的试验测试参数十分接近:面密度与孔隙率的相对偏差均在 2% 以内,平均孔径的绝对偏差仅为 $7.80\ \mu\text{m}$ 。其中差异较大的只有厚度值,产生偏差的原因可能与样品在固定过程中经过一定压缩,且后续图像重构流程中为确保成像质量损失了一部分厚度方向的切片有关,X 射线 μ -CT 获取的针刺非织造滤材三维模型厚度值相较试验测试值偏小。这也在一定程度上解释了针刺非织造滤材三维模型透气率与试验测试值偏差较大的现象(相对偏差约为 28%)。综上所述,本研究中采用的 X 射线 μ -CT 和图像处理流程重构出的针刺非织造滤材三维模型较为准确地反映了针刺非织造滤材的结构,能够很好地代表针刺非织造滤材的整体结构特性。

表 2 针刺非织造滤材与滤材三维模型结构性能参数对比

Tab. 2 Comparison of structural performance parameters between needle-punched nonwoven filter media and its 3D structural model

结构性能	针刺非织造滤材	滤材三维模型
面密度/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	124.97±6.75	129.32
厚度/ μm	3 915.7±165.3	2 317.25
孔隙率/%	97.67±0.13	96.32
平均孔径/ μm	73.53±9.29	81.33
透气率/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	1 365.43±122.41	1 747.64

2.3.2 针刺非织造滤材原位压缩模拟及结构特性演化

开展原位压缩模拟前,需设置非织造滤材的杨氏模量(E_F , GPa)和泊松比。由于纺织纤维的初始模量一般由 cN/dtex 表示,需考虑其纤维直径并进行单位转换。参考 Morton 等^[12]研究中的涤纶纤维应力-应变曲线,将纤维 1% 应变时的应力-应变曲线斜率设置为初始模量,计算得涤纶纤维的初始模量为 132 cN/dtex。涤纶纤维密度为 $1.38\ \text{g}/\text{cm}^3$,试验所用涤纶纤维的平均直径为 $13.39\ \mu\text{m}$ [图 1b)],经转换得到其单纤维的杨氏模量(E_f)为 18.2 GPa。结合非织造滤材的纤维体积分数(V_f)为 3.68%,同时假设该针刺非织造滤材内的纤维在二维平面上杂乱排列并呈各向同性,那么根据式(1)^[13]可得该非织造滤料的杨氏模量为 0.335 GPa。

$$E_F = E_f \times V_f \times \frac{1}{2} \quad (1)$$

由于非织造滤材的泊松比测量方法较为复杂,且无直接相关文献可参考,因此原位压缩模拟中的针刺非织造滤材的泊松比采用广义聚酯材料的泊松比,其数值为 0.4。

结合上述弹性模量和泊松比,经原位压缩模拟,可得针刺非织造滤材在不同受压状态的三维结构,如图 5a)所示,可以发现针刺非织造滤材压缩过程中在 X-Y 平面方向的实际尺寸几乎不变,但由于正泊松比效应的存在,其面密度是逐渐下降的[图 5b)],同时结构逐渐变致密,孔隙率不断降低[图 5b)]。从针刺非织造滤材孔径演化结果可知,针刺非织造滤材大孔孔径(D_{90} ,即 90%的孔的直径小于该数值)在压缩过程中快速降低,而中孔孔径(D_{50} ,即 50%的孔的直径小于该数值)和小孔孔径(D_{10} ,即 10%的孔的直径小于该数值)则呈现出平缓降低的趋势[图 5c)],这表明原位压缩导致的滤材结构致密化大大减少了针刺非织造滤材大孔孔径,而对中等孔径和小孔孔径的影响并不明显。

2.3.3 针刺非织造滤材透气性演化

经测试,针刺非织造滤材试样在 100 Pa 压强下的透气率为 $(1\,365.43\pm 122.41)\ \text{mm}/\text{s}$,而模拟预测值为 $1\,747.64\ \text{mm}/\text{s}$;针刺非织造滤材在 70 L/min 流量下的过滤阻力测试结果为 $(7.4\pm 0.4)\ \text{Pa}$,而预测值为 6.7 Pa。产生偏差的原因包括样品自身的不

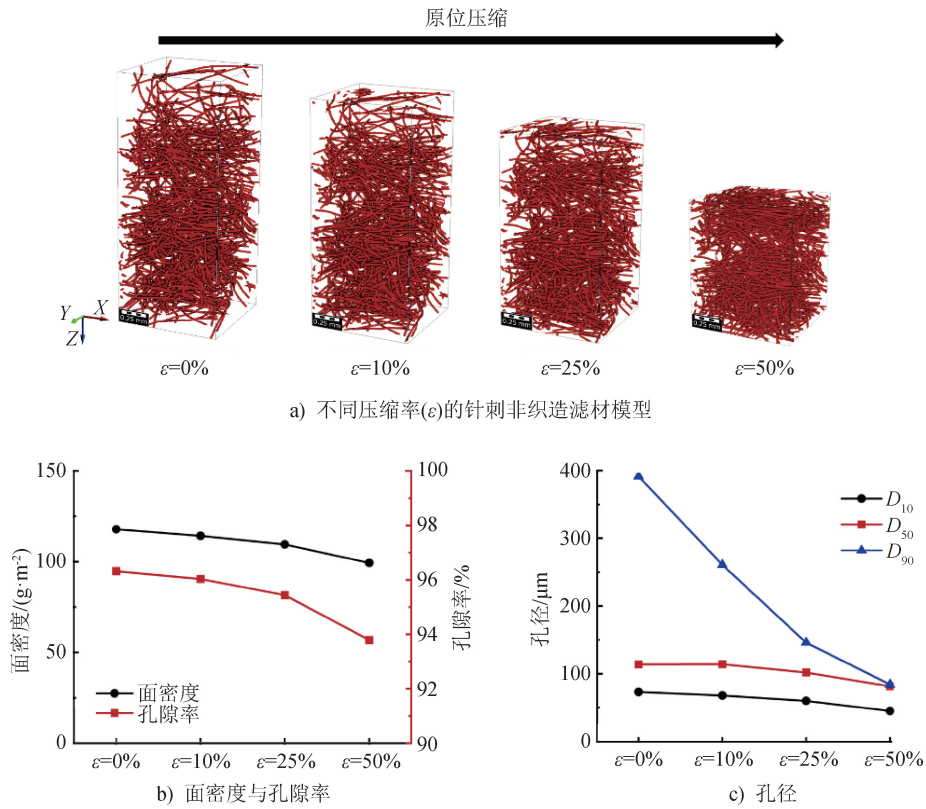


图 5 针刺非织造滤材的原位压缩及滤材孔径演化

Fig. 5 *In-situ* compression of needle-punched nonwoven filter media and evolution of its pore structures

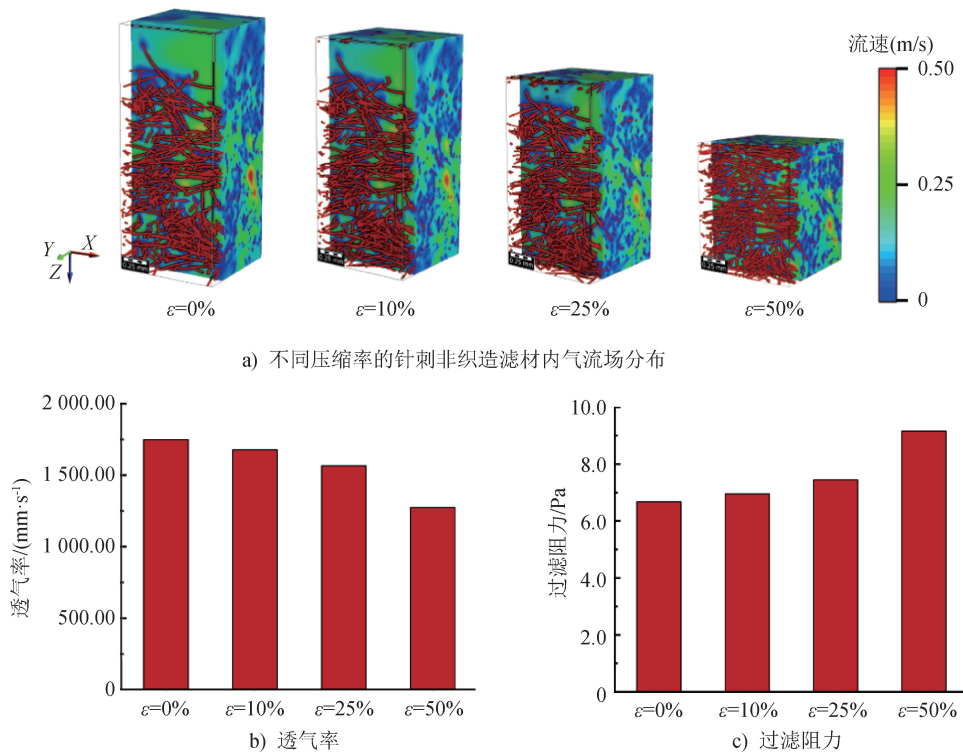


图 6 针刺非织造滤材的透气性演化

Fig. 6 Air permeability evolution of needle-punched nonwoven filter media

均匀性,以及体素尺寸偏大导致建立的模型精度偏低。

从宏观透气性能角度进行分析可以发现,针刺非织造滤材的透气率随着压缩过程的推进而逐渐下降[图 6b)],而过滤阻力随着压缩过程的推进而逐渐增加[图 6c)]。此外,如前文所述,由于正泊松比效应的存在,针刺非织造滤材面密度在受压时是降低的[图 5b)],这在一定程度上抑制了结构致密化导致的透气率下降和过滤阻力增加。原位压缩过程中滤材内气流场分布的演化如图 6a)所示。从微观尺度显而易见的是,针刺非织造滤材内对应微区区域的流速在逐渐下降,这是由于压缩作用使针刺非织造滤材结构致密化,急剧下降的大孔孔径[图 5c)]阻碍了气流通,造成透气率下降和过滤阻力增加。综上,本文研究的针刺非织造滤材原位压缩模拟及针刺非织造滤材内气流场演化,可为滤材宏观透气性演化的解析提供新视角。

3 结论

本文以涤纶纤维针刺非织造材料为试验滤材,借助同步辐射 X 射线 μ -CT 成像装置获取了针刺非织造滤材图像,再经切片重构与图像处理建立了针刺非织造滤材三维模型,然后对针刺非织造滤材三维模型进行原位压缩模拟,分析了针刺非织造滤材的结构特性与透气性的演化规律。该方法具有良好的普适性,可进一步结合纤维材料三维结构重建方法^[14]或随机生成算法^[15]等三维模型构建方法,预测其结构性能演化。

本文得出如下结论:

(1) 借助数值模拟方法研究针刺非织造滤材压缩行为并进行结构与性能预测是具有可行性的。

(2) 针刺非织造滤材受压过程中,大孔孔径(D_{90})快速下降,而中孔孔径(D_{50})和小孔孔径(D_{10})平缓降低。

(3) 微观尺度条件下,针刺非织造滤材内气流场演化过程揭示了原位压缩造成滤材结构致密化的现象,大孔孔径的降低将阻碍气流通过,造成透气率下降和过滤阻力增加。



期刊采编平台

中国知网下载

参考文献

- [1] JAGANATHAN S, VAHEDI TAFRESHI H, SHIM E, et al. A study on compression-induced morphological changes of nonwoven fibrous materials[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2009, 337(1/2/3): 173-179.
- [2] 朱婧瑶. 压缩空气用复合滤材过滤性能研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- [3] 令狐彩. 纤维滤材压缩性对气液聚结过滤性能的影响研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- [4] MERCIER C, KIRSCH R, ANTONYUK S. Analytical model for the initial efficiency of compressed nonwoven electret media for air filtration[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2025, 216: 549-563.
- [5] WU F, LI Y, CHEN X C, et al. Finite-element analysis on the compression-recovery process of cotton fiber assembly[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2023, 114(9): 1431-1442.
- [6] 吴帆, 李勇, 陈晓川, 等. 基于三维编织模型的棉纤维集合体压缩过程有限元建模与仿真[J]. *纺织学报*, 2022, 43(9): 89-94.
- [7] CHANG C, LYU Q M, CAI L H, et al. Prediction of filtration performance of compressed fibrous media[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 287: 120515.
- [8] SONG Y, SHIM E. Structure characterization of the clogging process of coarse fibrous filter media during solid particle loading with X-ray micro-computed tomography [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 273: 118980.
- [9] SONG Y, SHIM E. 3D X-ray tomographic microstructure analysis of dust-clogging inside nonwoven fibrous filter media [J]. *Journal of Membrane Science*, 2022, 664: 121067.
- [10] SONG Y, SHIM E. High-fidelity 3D simulation of dust-loading behavior and clogging process of coarse nonwoven filter media considering collision effect [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 344: 127046.
- [11] HOESS K M, HAHN F J, SCHMAUDER S, et al. Predicting the mechanical behavior of a polypropylene-based nonwoven using 3D microstructural simulation [J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2022, 113(12): 2609-2620.

(下转第 36 页)