

纸滤芯的流体流动与纸折变形的数字化仿真研究

卢进军, 李继新, 陈克新, 曹海宇, 徐洪斌, 乔梦华

中国北方车辆研究所, 北京

收稿日期: 2023年3月20日; 录用日期: 2023年9月7日; 发布日期: 2023年9月14日

摘要

滤芯过滤过程的仿真是空气滤清器设计过程中关键的设计方法。过滤材料在数值仿真中视为一种多孔介质, 为了解决多孔-流体结构相互作用的问题, 本文研究了一种有效的算法, 从建模和离散两种技术方向出发, 采用扩展的任意拉格朗日欧拉坐标法, 在流体问题和弹性问题之间相互迭代, 使用特殊的数值方法来求解分离的方程组。本文使用Navier-Stokes-Brinkman方程组, 基于四边形网格上的有限体积离散化, 使用多点通量近似(MPFA)方法来实现粗糙和拉伸四边形网格上精确的数值解, 最后通过试验室测量结果对仿真结果进行了验证, 证明了通过算法得到的变形量数值解与试验结果具有精准的一致性, 说明该算法可以有效预测流体作用下的纸折变形量。

关键词

纸滤芯, 纸折, 过滤材料, 流体, 变形

Digital Simulation Analysis of Fluid Flow and Paper Folding Deformation in Paper Filter Element

Jinjun Lu, Jixin Li, Kexin Chen, Haiyu Cao, Hongbin Xu, Menghua Qiao

China North Vehicle Research Institute, Beijing

Received: Mar. 20th, 2023; accepted: Sep. 7th, 2023; published: Sep. 14th, 2023

Abstract

The simulation of the filter filtration process is a key design method in the air filter design process. The filter material is regarded as a Porous medium in the numerical simulation. In order to solve the problem of porous fluid structure interaction, this paper studies an effective algorithm. Start-

ing from the two technical directions of modeling and dispersion, the extended arbitrary Lagrangian Euler coordinate method is used to iterate between the fluid body problem and the elastic problem, and a special numerical method is used to solve the separated equations. In this paper, the Navier Stokes Brinkman equations are used, based on the finite volume discretization on the quadrilateral grid, and the multi-point flux approximation (MPFA) method is used to achieve accurate numerical solutions on the rough and stretched quadrilateral grid. Finally, the simulation results are verified by the laboratory measurement results, and it is proved that the numerical solutions of deformation obtained by the algorithm are accurate and consistent with the experimental results. This indicates that the algorithm can effectively predict the amount of paper folding deformation under fluid action.

Keywords

Paper Filter Element, Paper Fold, Filter Material, Fluid, Deformation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当前纸折状空气滤芯被广泛应用于各个行业,其主要特点是应用纸折状设计,在有限的体积内达到足够大的过滤面积。随着动力装置功率密度的提高,滤清器的体积越来越小,单位体积滤芯的等效流速越来越高,而保养周期的要求则是越来越长,需要重新调整空气滤清器滤芯的尺寸和滤材面积,在有限的体积内使用更薄的过滤介质,滤材面临在高速气流作用下发生变形的问题,剧烈的变形会部分和完全地阻挡纸折通道,从而显著降低滤芯的效率。

本文主要研究工作是在圆形纸折滤芯的二维横截面上进行流体流动和孔隙弹性变形的数值模拟。第二节给出了数学模型,详细展开为一个耦合的流体-多孔结构相互作用问题的完整模型,该模型由 Navier Stokes Brinkman 方程的流动方程和 Biot 孔隙弹性系统的变形组成,并简要讨论了模型的简化问题。

在第三节中,简要地描述了数值算法,并给出了详细的描述参考。第四部分给出了在均匀载荷情况下圆形纸折滤芯二维横截面纸折变形模拟的数值结果,第五节给出了非均匀载荷情况下的纸折变形模拟结果。第六部分应用试验数据验证模型所得出的一些仿真结论。最后,在最后一节中得出了总体研究结论。

2. 数学模型

流体与多孔介质相互作用的数学模型包含两种运动状态的分析与描述:流动运动状态和多孔介质变形状态。

2.1. 流体问题

本文我们分析的流体局限于不可压缩牛顿层流,即使在这种假设条件下,流体在多孔介质中的流动仍然是一个复杂的问题,因为其尺寸量级的关系,孔隙模型在计算量上非常巨大,为了解决这个问题,通常考虑多孔区域中的流动中有效多孔介质(适用于达西公式)的流动模型。

在我们的理解中,描述平面流体区域中耦合 Navier Stokes 方程的流动与达西方程在多孔介质中的基于 Navier-Brimman 方程模型的数值计算效率低。公式如下:

$$\underbrace{\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\rho \mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{v})}_{\text{Navier-Stokes}} + \overbrace{\mu K^{-1} \mathbf{v}}^{\text{Darcy}} = -\nabla p$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$K^{-1} = \begin{cases} 0, & x \in \Omega_f \\ \text{const}, & x \in \Omega_p \end{cases}$$
(1)

式中： p 为压力， \mathbf{v} 为流体速度， ρ 为流体密度， μ 为流体粘度。而参数 K ，则用来表示过滤介质的渗透性，在模型中，在自由流动区域中假设渗透率是 100%，并且它是一个给定的常数。

在多孔介质区，由于材料密度或材料的变化引起的渗透率的局部变化，或由于在过滤过程中颗粒的不均匀加载，渗透参数则是一个变量值。

2.2. 孔隙弹性问题

通常应用 Biot 系统描述多孔过滤介质中的耦合流动和变形，这种变形主要是由上游和下游压力的差异引起的[1]，下列列式为 Biot 方程组：

$$-G\Delta u - \frac{G}{1-2\nu} \nabla \text{div}(u) - \alpha \nabla p = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma_G p + \alpha \text{div}(u)) - \frac{K}{\eta} \Delta p = 0$$

$$\sigma = G(\nabla u + (\nabla u)^T) + \left(\frac{2\nu G}{1-2\nu} - \alpha p \right) I$$
(2)

式中： u 为位移， p 为压力， G 为重力，其它描述材料参数可以在文献[2]中找到。求解 Biot 方程组相当复杂，需要巨大的运算量和时间。在许多滤清器的纸折滤芯中，过滤介质的厚度与它的纵向尺寸相比是非常小的，在这种情况下，多孔纸折可以被建模为多孔弹性壳模型，而平板状滤芯则被建模为多孔弹性板模型。多孔弹性板模型在文献[2]中已经讨论过，并详细描述了这样的模型的验证。

2.3. 网格

采用有限体积法对模型进行离散化可以保证计算模型离散过程中的局部守恒。为了初始状态下和变形后准确地捕获过滤介质的形状，需要采用非结构化的边界拟合四边形网格，如图 1 所示。对于这种复杂的设置，当网格可以倾斜和/或拉伸时，选择多点通量理算近似算法求解[1] [3]。对于离散化问题的求解，可以应用商业有限元软件进行分析。

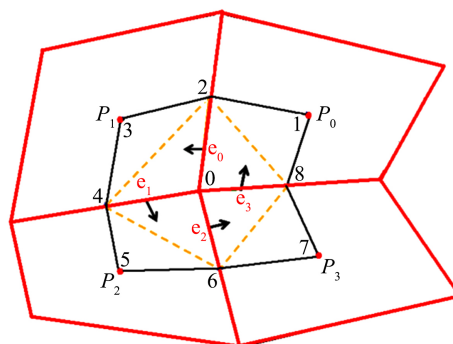


Figure 1. Computational grid for approximate discretization of multipoint fluxes
 图 1. 多点通量近似离散化的计算网格

3. 数值结果

3.1. 规则加载

在滤清器研发过程中，不同的滤芯选型设计得到不同压力分布和不同的速度场。压力和速度的差异导致不同类型的纸折产生不同程度的变形。在某些情况下，设计导致对称性的旋转流动，但在其他设计中，流动却难以保证均匀性。首先研究具有旋转周期性的滤芯，让我们考虑空气滤芯的水平横截面，如图 2 中的一个。为了简化结构及可视化，我们设定一个虚拟空气滤芯，它有 30 个相对短的纸折，相对于实际的空气滤芯，纸折没有密集地填满，参见图 2。

在第一个数值模拟中，我们考虑入口位于空气滤芯元件内部，出口位于空气滤芯外壳的外侧。作为流体流动的边界条件，我们规定入口上的恒定入流速度作用到每平方米上为 0.04 m/s ，出口上的恒定压力为 7.5 kPa ，设置速度入口和压力出口。为了使过滤介质不完全膨胀或塌陷，我们必须对某些部分进行约束，在这个数值仿真过程中，将纸折内尖的位移设置为 0。这对应于空气滤芯纸折尖端通过胶水或以某一种方式固定到套管上的设计。在这种情况下，我们可以利用旋转周期性来简化问题。经过仿真计算得到计算结果，如图 2 所示，我们给出了压力分布，其中红色是最高压力，蓝色是最低压力。在图 2 中，我们给出了速度的大小，红色是最高的，深蓝是最低值。

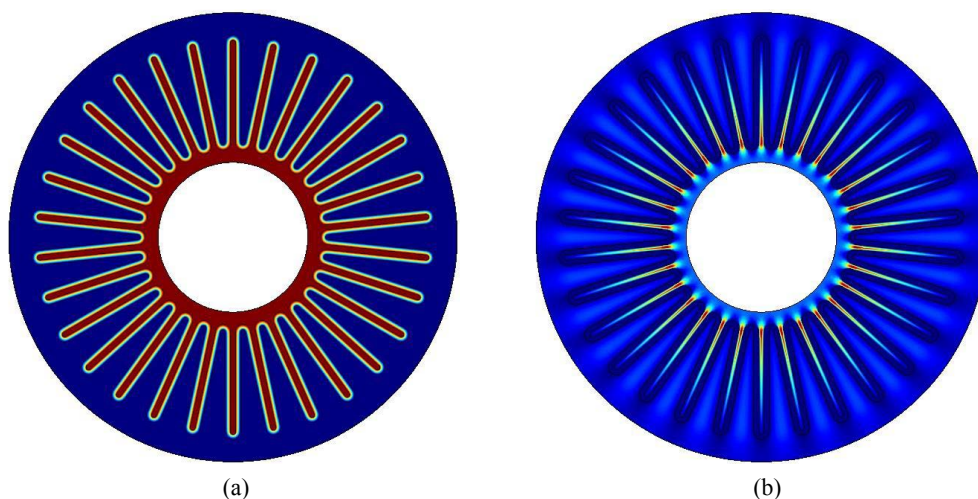


Figure 2. Pressure distribution nephogram (a) and velocity distribution nephogram (b) of an internal inflow filter element

图 2. 某内部入流滤芯的压力分布云图(a)与速度分布云图(b)

在这种旋转对称边界条件的情况下，过滤介质上的载荷是均匀的。在图 3 中，我们给出了在均匀载荷作用下的空气滤芯纸折的变形。黑线为纸折变形前的初始位置。颜色代表位移的大小，红色是最高的，蓝色是最低的。

在图 3 的右侧可以清楚地看到变形后的纸折接近彼此接触。这意味着，即使最初过滤元件由于多孔介质特性而被认为具有压降，在偏转之后，由于通道变窄引入的附加压降，恒定流量下的压降将增加。如果纸折最终接触，过滤介质的大部分面积将不再用于颗粒过滤。在这里应该引起读者注意的是，目前还没有办法模拟接触问题，但是更需要引起注意的是，如果仿真过程中出现大面积的接触，这已经可以表明初始设计是不好的。研究过程中更重要的是分析哪些参数可以促进纸折的偏转，以及纸折如何偏转到接触的时刻。

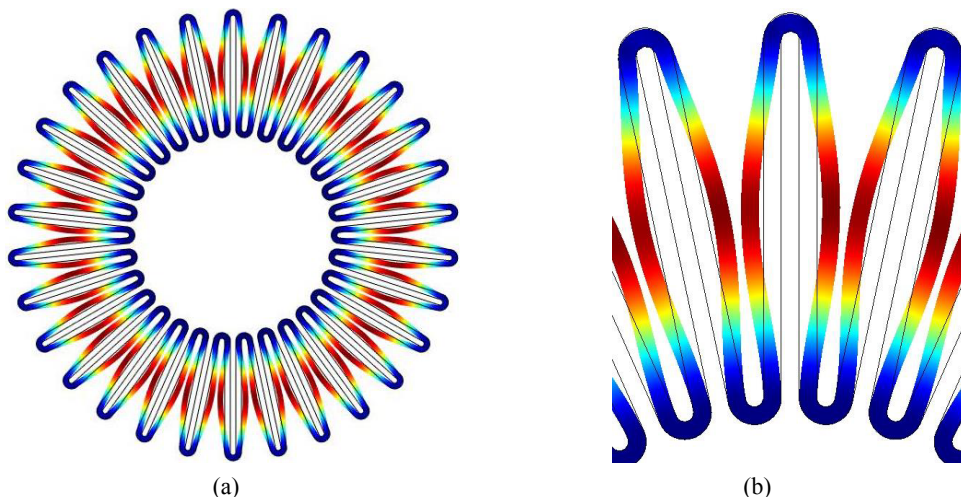


Figure 3. Deformation of filter element under regular load-full filter element deformation diagram (a) and partial (b)

图 3. 滤芯在受规则载荷时的变形情况 - 全滤芯变形图(a)和局部(b)

3.2. 不规则加载

现在我们考虑图 2 所示的相同几何形状的不同边界条件。我们将纸折再次固定在相同的点上，但是我们改变了流体流动的边界条件。设定出口是在过滤元件内部，入口是外圆顶部的小截面。在外圈的其余部分，预先假定无滑动边界条件，对应于滤芯套筒的壁面。这表示在空气滤芯壳体的一侧有一个管道入口。经过计算，我们给出了图 4 中模拟的压降和速度大小。同样，我们用红色显示最高值，蓝色表示最低值。

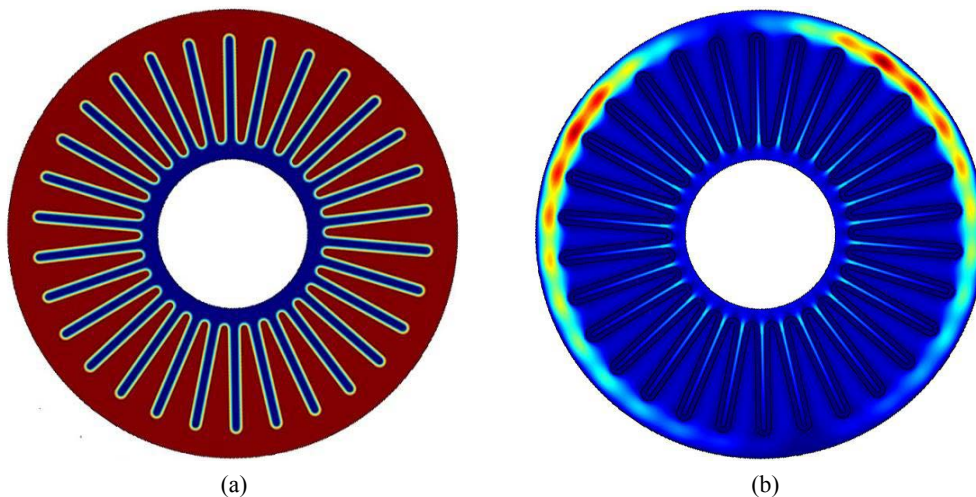


Figure 4. Pressure distribution nephogram (a) and velocity distribution nephogram (b) of the external inlet of the filter element

图 4. 滤芯外部入口的压力分布云图(a)与速度分布云图(b)

仅考虑图 4(a)中的压力分布，在这种情况下，通过过滤介质的压降是均匀的，并且介质的位移将类似于图 3 中所示的状态。流动速度分布云图清楚地显示了大部分流体是如何围绕纸折到达远离空气滤芯入口的过滤部分的。即使压降主要通过过滤介质，在入口区域内也存在压力梯度。这导致纸折上的不均

匀载荷和图 5 所示的非均匀变形。我们设定空气滤芯靠近入口的部分的位移。黑线是空气滤芯纸折的初始位置。颜色代表位移的大小，红色是最大的，蓝色是最小的。

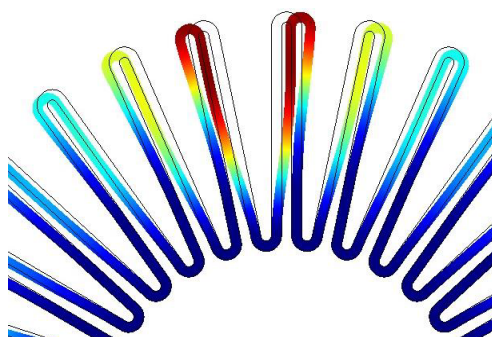


Figure 5. Deformation of filter paper fold under non-standard loading conditions

图 5. 非规格加载条件下滤芯纸折的变形

纸折变形在这种情况下包括纸折弯曲和内部纸折通道的狭窄化。在空气滤芯设计中，较长的纸折长度和密集的纸折分布，容易导致这样的变形，造成纸折拥挤，减少了实际过滤表面。

4. 试验验证

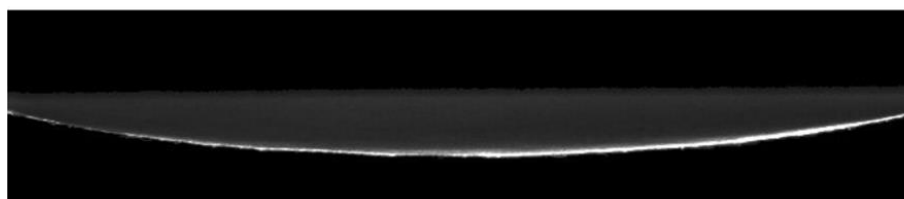
为了验证算法和仿真软件计算结果真实性，进行了与仿真结果与实验室测量结果的对比分析。由于在实际过程中难以准确地观察圆形滤芯纸折的变形状态与变形量，因此采用平板滤芯纸质过滤介质进行了验证。在空气滤清器试验台上，采用空气滤芯入流 - 出流工装，对平板空气滤芯表面按照正反两个方向施加气流，气流的流量通过平板滤芯过滤面积和入流管道截面得到，在滤芯表面使用高速相机捕捉纸折随气流冲击的变形量，如图 6 所示。

建立 1:1 方形纸折多孔介质模型，应用仿真算法对平板纸折进行计算得到平板滤芯的变形图。图 7 为平板滤芯的变形 - 理实验与数值计算结果的对比结果。

直管观察结果表明，计算机仿真得到的变形量与滤清器试验台得到的物理变形量具有良好的一致性。



(a) 初始状态



(b) 变形后的状态

Figure 6. Deformation of flat filter element (physical experiment)

图 6. 平板滤芯的变形(物理实验)

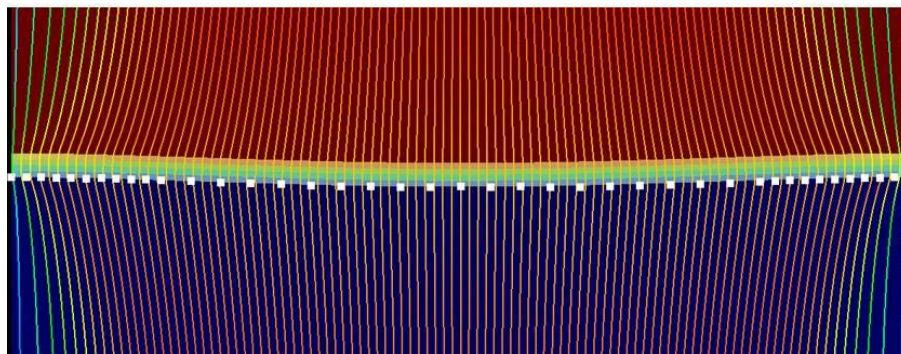


Figure 7. Comparison of deformation physics experiment and numerical calculation results of flat filter element

图 7. 平板滤芯的变形 - 理实验与数值计算结果的对比

5. 结论

纸折变形是由于流体与多孔过滤介质的复杂相互作用的结果，并且还取决于过滤元件壳体。纸折变形可显著降低过滤效率，在极端情况下可导致破损。纸折变形的计算机模拟可以帮助工程师设计更好的元件，或者为现有元件设计合适的过滤介质。本文以折状过滤材料为研究对象，从精简计算量出发，在圆形纸折滤芯的二维横截面上进行流体流动和孔隙弹性变形的数值模拟。通过 Navier Stokes Brinkman 方程的流动方程和 Biot 孔隙弹性系统的变形组成数学模型，形成耦合流体 - 多孔结构相互作用问题的完整计算模型，基于两种计算状态得到了在均匀和非均匀载荷情况下圆形纸折滤芯二维横截面纸折变形模拟的数值结果，最终应用空气滤清器试验室试验数据验证模型的仿真结论，证明了算法的精度。

参考文献

- [1] Iliev, O., Kirsch, R., Lakdawala, Z. and Printsypar, G. (2014) MPFA Algorithm for Solving Stokes-Brinkman Equations on Quadrilateral Grids. In: Fuhrmann, J., Ed., *Finite Volumes for Complex Applications VII - Elliptic, Parabolic and Hyperbolic Problems: FVCA 7*, Springer International Publishing, Berlin Cham, 647-654. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05591-6_64
- [2] Grosjean, N., Iliev, D., Iliev, O., Kirsch, R., Lakdawala, Z., Lance, M., Michard, M. and Mikelić, A. (2015) Experimental and Numerical Study of the Interaction between Fluid Flow and Filtering Media on the Macroscopic Scale. *Separation and Purification Technology*, **156**, 22-27. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.09.010>
- [3] Aavatsmark, I. (2007) Multipoint Flux Approximation Methods for Quadrilateral Grids. *9th International Forum on Reservoir Simulation*, Abu Dhabi, 9-13 December 2007, 22-66.