

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2024.08.008

# 基于均值孔隙介质层的阻尼孔壁面摩擦效应研究\*

杨蕾, 罗瑜\*, 罗艳蕾

(贵州大学机械工程学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 阻尼孔广泛用于各种液压机械系统, 其孔径通常在 0.3 mm 到 2 mm 之间, 这种微小流道的流动不同于常规管道, 壁面粗糙度对其流动特性有重要的影响。针对这一问题, 以安装在液压电磁换向阀中的阻尼孔为研究对象, 采用均值孔隙介质层 (PML) 模拟了阻尼孔的壁面粗糙度。首先, 建立了阻尼孔的物理模型, 使用 ICEM CFD 软件对模型进行了网格划分; 然后, 构建了流体控制方程以及 PML 动量方程, 求解出了黏性阻力系数和惯性阻力系数; 最后, 采用了流体仿真软件 Fluent, 分析了壁面粗糙度对阻尼孔流体流动特性、流体完全发展距离长度以及流体温升的影响。研究表明: 仿真所得阻力特性与文献中实验所得阻力特性结果一样, 采用 PML 表征壁面粗糙度的方法可行; 由于壁面粗糙度, 阻尼孔中的流体受到的阻力增大, 导致从阻尼孔入口至出口压降增加了 2.25%; 相同边界条件下, 含 PML 的阻尼孔比光滑阻尼孔的完全发展距离长 0.1 mm 左右; 壁面的发热量平均提高了 1.5%。

**关键词:** 液压电磁换向阀; 壁面粗糙度; 均值孔隙介质层; 微小流道流动; 阻尼孔流体流动特性; ICEM CFD 软件

中图分类号: TH137.52

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2024)08-1398-08

## Wall friction effect of damping hole based on mean porous medium layer

YANG Lei, LUO Yu, LUO Yanlei

(School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** Damping holes were widely used in various hydraulic mechanical systems, with their apertures typically ranging from 0.3 mm to 2 mm. The flow of this tiny flow channel was different from that of conventional pipes, and the wall roughness has an important influence on its flow characteristics. Aiming at the problem of the above issue, the damping hole installed in the hydraulic solenoid reversing valve was taken as the research object, using the porous media layer (PML) to simulate the surface roughness of the damping hole. Firstly, the physical model of the damping hole was established, and the model was meshed using ICEM CFD software. Then, the fluid governing equation and the PML momentum equation were established to solve the viscous resistance coefficient and inertial resistance coefficient. Finally, the fluid simulation software Fluent was used to analyze the influence of wall roughness on the fluid flow characteristics of the damping holes, the length of the complete fluid development distance and the temperature rise of the fluid. The research results show that the resistance characteristics obtained by simulation are the same as those obtained by experiments in the literature, and the method of characterizing the wall roughness by using the value porous medium layer is feasible. Due to surface roughness, the resistance experienced by the fluid in the damping hole increases, resulting in a 2.25% increase in the pressure drop from the inlet to the outlet of the damping hole, and under the same boundary conditions, the damping hole with the PML is about 0.1 mm longer than the complete development distance of the smooth damping hole, and the heat value of the wall is increased by 1.5% on average.

**Key words:** hydraulic electromagnetic reversing valve; wall roughness; porous medium layer (PML); flow in micro-channel; fluid flow characteristics of damping hole; ICEM CFD software

收稿日期: 2024-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52265007); 贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2022]一般87); 贵州省科技创新基地建设项目(黔科合中引地[2023]010)

作者简介: 杨蕾(1996-), 女, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要从事流体和电液比例控制方面的研究。E-mail: 18786304214@163.com

通信联系人: 罗瑜, 女, 博士, 副教授, 硕士生导师。E-mail: luoyforever@163.com

## 0 引言

目前,液压装备广泛应用于工程机械、机床、汽车制造业、冶金机械、武器装备等领域。而在液压系统中,阻尼孔是一个非常重要的结构,起着缓解压力冲击、减少振动的作用<sup>[1-3]</sup>。阻尼孔的孔径通常在 0.3 mm 到 2 mm 之间<sup>[4]</sup>。

近年来的研究发现,不同于宏观尺寸通道中流体的流动,对于微、小流道,在相对粗糙度小于 5% 时,壁面粗糙度对于流体流动的影响依然很明显<sup>[5-7]</sup>。

PENG X F 等人<sup>[8]</sup>研究了水力直径 133  $\mu\text{m}$  ~ 167  $\mu\text{m}$  的矩形不锈钢通道,结果发现,只要存在粗糙度,就会对整个通道的流动产生影响,造成提前转捩。LALEGANI F 等人<sup>[9]</sup>研究了 50  $\mu\text{m}$  ~ 300  $\mu\text{m}$  的微管道,结果发现,随着粗糙元的高度和尺寸的增大,压降和摩擦系数也会相应地增大;然而,由于该研究的流道水力直径较小,其结果不能直接用于指导阻尼孔的设计。MALA M 等人<sup>[5]</sup><sup>[14]</sup>通过假设壁面粗糙度,增加了壁面附近流体的有效黏度,从而增加了阻力并影响流动特性,计算出了管内的泊肃叶数(Poiseuille number,  $Po$ )大于 64,其值增加了 10% ~ 20%;但是,该结论在高雷诺数(Reynolds number,  $Re$ )条件下,无法很好地解释摩擦系数变化的趋势。PFUND D<sup>[10]</sup>通过实验研究发现,只有相对粗糙度小于 1% 时,粗糙度的影响才可以忽略不计;但在后续的研究中发现,在相对粗糙度更小的情况下,粗糙元对于流体的流动仍有扰动。鲁聪达<sup>[11]</sup>采用有限元方法,发现了粗糙微通道中各个位置的压降呈线性增大的趋势;但由于其采用的介质黏度较小,因此粗糙度对流体的阻力影响也较小。FARIAS M H 等人<sup>[12]</sup>利用粒子图像技术测量了壁面粗糙度微通道内的流动情况,发现了壁面粗糙度对流动有影响;但其采用的计量方式还不够精确,还需进一步研究。常开忠<sup>[13]</sup>利用 Fluent 对圆环通道内层流流动的压降和摩擦进行了数值模拟;但其设置条件不够全面,得到的结果具有局限性。

以上这些研究,分析的都是较长的微、小管道,管道的长度在几十厘米到几米之间,针对流道的水力直径在 50  $\mu\text{m}$  ~ 300  $\mu\text{m}$  或者在 1 mm 左右,而长度为几毫米、水力直径在 300  $\mu\text{m}$  ~ 1 mm 之间的阻尼孔则鲜有研究。

随着计算机技术的发展,数值分析方法也逐渐应用到各行各业。采用数值分析方法分析微、小流道,可以避免在实验中由于干扰造成的误差,从而专注于某一关键的因素。

相较于传统实验,数值模拟方法安全且成本低,也能更快得出结果。杨小民等人<sup>[14]</sup>采用计算流体力学方法,分析了阻尼孔的直径对于单层弹性环式挤压油膜阻尼器的影响。王传里等人<sup>[15]</sup>采用 AMESim 对卸荷溢流阀中阻尼孔的平衡性能进行了分析,并对其进行了优化。王跃等人<sup>[16]</sup>采用 Fluent 对冲压机床多孔式液压缓冲器的阻尼孔进行了设计与分析;然而,他们的研究设计中都未考虑壁面粗糙度对阻尼孔流动的影响。张奥<sup>[17]</sup>采用 Fluent,探究了喷孔内燃油的壁面浸润性、粗糙度对流动特性、空化水平、流量系数的影响,结果发现,粗糙度对于喷孔的影响比浸润性条件的影响更大;但相较于阻尼孔,喷孔的直径小且有效长度短。

笔者采用 PML 近似模拟阻尼孔表面的粗糙元,对孔径在 0.3 mm ~ 0.7 mm 之间的阻尼孔,利用 CFD 软件进行模拟仿真试验,研究阻尼孔的壁面摩擦效应,分析阻尼孔的壁面粗糙度对流动特性、阻尼孔压降、速度及湍动能的影响。

## 1 数学模型

### 1.1 几何模型

此处,笔者以安装在液压电磁换向阀中的阻尼孔为研究对象。该阻尼孔安装于电磁阀的 P 口,电磁阀的孔径为 6 mm。

阻尼孔的结构如图 1 所示。

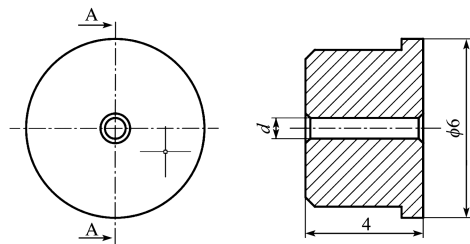


图 1 阻尼孔的结构

Fig. 1 Structure of the damping hole

图 1 中,阻尼孔的孔径为  $d$ ,阻尼孔的有效长度为 4 mm,在入口以及出口均有一个 C0.5 的倒角。笔者采用均值孔隙介质层来模拟阻尼孔的表面粗糙度。

为了充分体现粗糙元对于流体的影响,笔者采用粗糙元的最大轮廓高度来描述粗糙度,该类型阻尼孔的粗糙度为  $Ra3.2$ ,根据国标 GB/T1031—2009,对应的最大轮廓高度  $Rz$  为 12.5。

由此可知,均值孔隙介质高度为 12.5  $\mu\text{m}$ 。

### 1.2 计算模型

笔者建立的计算模型如图 2 所示。

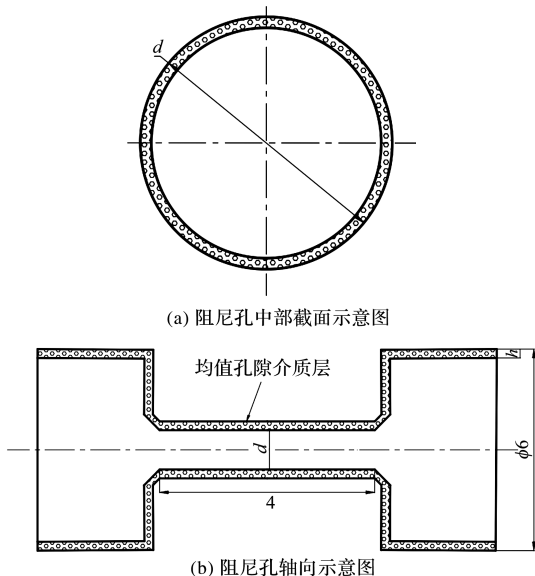


图 2 均值孔隙介质层的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the mean pore media layer

根据上述参数,笔者建立了阻尼孔仿真模型,如图 3 所示。

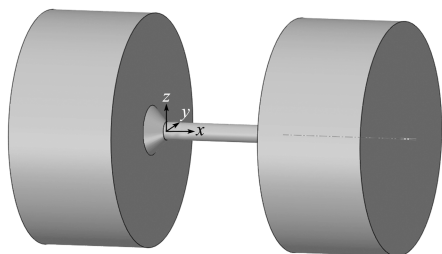


图 3 阻尼孔的仿真模型

Fig. 3 Simulation model of damping hole

## 2 数值计算

### 2.1 控制方程

不可压缩流体在微流动过程中,仍然满足连续性假设,对该流场列方程如下<sup>[18]</sup>:

连续性方程表示如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial(\rho v_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

式中: $\rho$  为流体密度; $j$  为速度矢量在  $x, y, z$  方向上的分量。

动量方程表示如下:

$$\rho \frac{dv_x}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho F_x \quad (2)$$

$$\rho \frac{dv_y}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho F_y \quad (3)$$

$$\rho \frac{dv_z}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho F_z \quad (4)$$

式中: $p$  为流体微元上的压力; $\tau$  为切向力; $F$  为单位流体微团上的体积力。

对于在多孔介质层中的情况,笔者在控制动量方程中增加了动量源项。

增加的动量源项表示如下:

$$S_i = - \left( \sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (5)$$

式中: $S_i$  为动量源项; $i$  为速度矢量在  $x, y, z$  方向上的分量; $D_{ij}, C_{ij}$  为对角矩阵; $\mu$  为流体的黏性系数。

多孔介质简化后的均值孔隙介质动量方程表示如下:

$$S_i = - \left( \frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \quad (6)$$

式中: $\alpha$  为渗透率; $C_2$  为对角矩阵  $C$  对应的值,也是惯性阻力系数(因子); $\frac{1}{\alpha}$  为对角矩阵  $D$  对应的值。

在多孔介质的达西模型中,压降通常与速度成比例,而常数  $C_2$  被认为是 0,忽略加速度和扩散,多孔介质的达西模型表示如下:

$$\nabla p = - \frac{\mu}{\alpha} v \quad (7)$$

在 Fluent 中,3 个方向计算的压降分别表示如下:

$$\Delta p_x = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{xj}} v_j \Delta n_x$$

$$\Delta p_y = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{yj}} v_j \Delta n_y$$

$$\Delta p_z = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{zj}} v_j \Delta n_z \quad (8)$$

式中: $\frac{1}{\alpha_{ij}}$  为矩阵  $D$  的元素; $\Delta n_x, \Delta n_y, \Delta n_z$  为 3 个方向的介质厚度。

根据上述方程,在已知压降、速度和流体黏度的情况下,便可以求出黏性阻力系数  $\frac{1}{\alpha}$ 。

$C_2$  在源项中提供了多孔介质惯性损失的校正,表示了单位体积多孔介质中,由于惯性效应造成的压力损失系数,从而可以将多孔介质的方程简化表示如下:

$$\nabla p = - \sum_{j=1}^3 C_2 \left( \frac{1}{2} \rho v_j |v| \right) \quad (9)$$

由此,通过简化方程  $\nabla p = C_2 \frac{1}{2} \rho v^2$ ,即可推出惯性

阻力系数: $C_2 = \frac{\nabla p}{\frac{1}{2} \rho v^2}$ 。

## 2.2 求解方法

笔者采用 CFD 流体仿真软件进行仿真试验,选用 46 号液压油(密度  $\rho = 875 \text{ kg/m}^3$ , 动力黏度为  $\mu = 0.046 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ), 边界条件设置为压力进口与压力出口; 同时, 为保证计算结果的准确性, 所有项的残差控制在  $10^{-6}$  以下。

## 2.3 网格无关性与算法验证

笔者使用 ICEM CFD 对模型进行网格划分。

模型网格数量为 5 104 080 个, 每个部分均采用结构化网格, 网格最低质量为 0.46, 纵横比在 20 以内; 其中, PML 模型部分的质量在 0.99 以上, 满足仿真模拟需求。

笔者对进口压力为 3 MPa、出口压力为 0.35 MPa 的阻尼孔进行网格无关性验证; 将网格数量增加 1.5 倍后, 得到的仿真结果相差 1.7%, 满足网格无关性条件。

故笔者选用较少网格数的这个方案。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 阻力特性

通常情况下, 流体流动的阻力特性采用泊肃叶数来表示。泊肃叶数是摩擦阻力系数  $f$  与雷诺数  $Re$  的乘积, 其计算公式表示如下:

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu}$$

$$f = \Delta P \cdot \frac{D_h}{l} \cdot \frac{2}{\rho v^2}$$

$$Po = f \cdot Re \quad (10)$$

式中:  $\rho$  为流体密度;  $v$  为流体流动速度;  $D_h$  为阻尼孔的水力直径;  $\mu$  为流体黏度;  $\Delta P$  为阻尼孔进出口的压差;  $l$  为阻尼孔的长度。

相对粗糙度的计算公式表示如下:

$$\varepsilon = \frac{h}{d} \quad (11)$$

式中:  $h$  为绝对粗糙度;  $d$  为流道水力直径。

为了探究管道内壁的粗糙度对于流动阻力的影响, 笔者通过选择 0.3 mm、0.4 mm、0.5 mm、0.6 mm、0.7 mm 五个不同直径的阻尼孔, 设置相同的边界条件进行仿真试验, 研究雷诺数与泊肃叶数之间的关系; 同时, 选择直径为 0.5 mm 的阻尼孔, 分别取  $8.6 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 、 $12.5 \mu\text{m}$ 、 $15 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$  五个不同的粗糙元高度进行研究试验, 研究相对粗糙度与泊肃叶数的关系。

通过仿真试验, 笔者得到了雷诺数和相对粗糙度

与泊肃叶数的关系, 如图 4 所示。

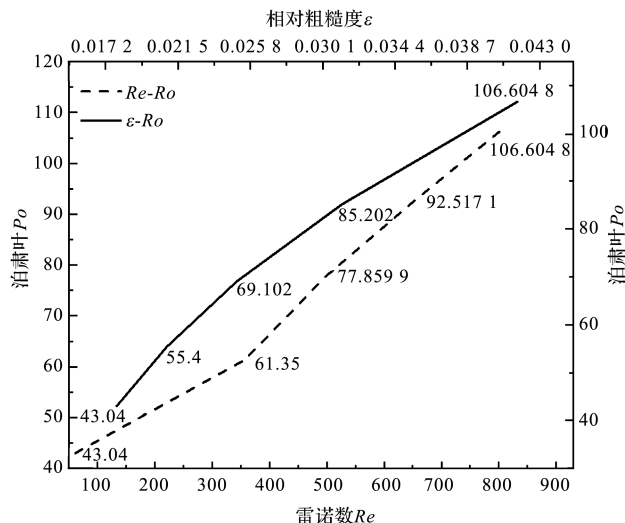


图 4 雷诺数、相对粗糙度与泊肃叶数的关系  
Fig. 4 Relationship between Reynolds number, relative roughness and Poiseuille number

从图 4 中可知: 随着雷诺数的增加, 泊肃叶数也随之增加, 说明雷诺数增加, 流体流动的阻力特性增加; 泊肃叶数随着相对粗糙度的增大而增大, 说明随着粗糙元高度的增加, 粗糙元对于管道中流体流动的阻力就会越大。

WU H Y<sup>[19]</sup> 的实验数据如图 5 所示。

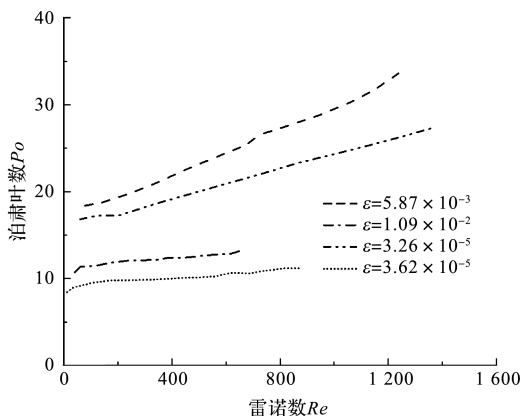


图 5 WU H Y 的实验数据  
Fig. 5 Data from the WU H Y literature

从图 5 可知: 笔者根据图 4 得出的结论, 即泊肃叶数随着雷诺数增加而增加, 与根据 WU H Y 的实验数据得出的结论一致。

由此证明, 采用 PML 代替粗糙元研究阻尼孔摩擦效应的方法具有可行性。

### 3.2 压降的分布

笔者对光滑阻尼孔与带有 PML 的阻尼孔设置进口压力为 3 MPa, 出口压力为 0.35 MPa。

在相同的边界条件下, 阻尼孔的压降如图 6 所示。



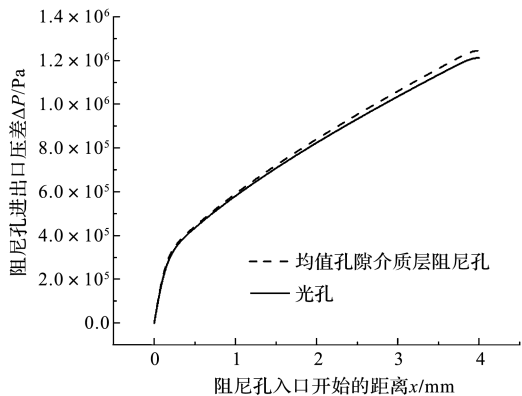
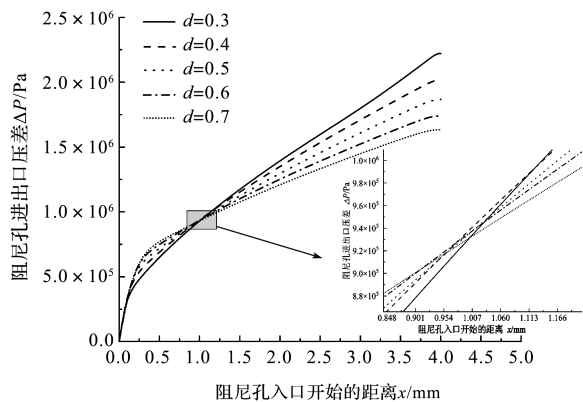


图 6 光孔与均值孔隙介质模型的压降对比

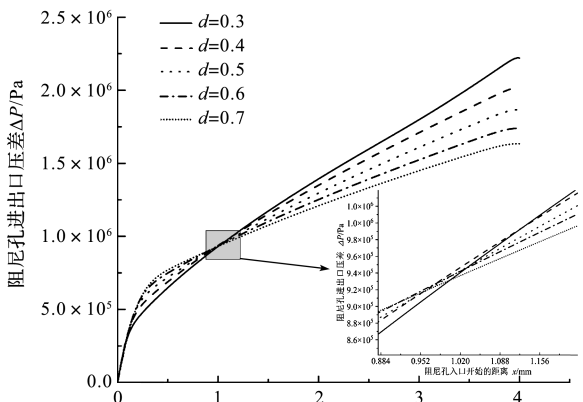
Fig. 6 Comparison of the pressure drop between the optical aperture and the mean pore media model

从图 6 中可知:PML 模型阻尼孔的压降相较于光滑阻尼孔的压降增大了 2.25%。这是因为壁面的 PML 对流体产生了更大的阻力,因此导致了更多的能量损失<sup>[20]</sup>。

笔者对阻尼孔直径为 0.3 mm、0.4 mm、0.5 mm、0.6 mm、0.7 mm 均设置进口压力 3 MPa,出口压力 0.35 MPa,然后分别计算这五个阻尼孔中心的压降,得到了不同直径压降图,如图 7 所示。



(a) 光滑孔压降图



(b) 均值孔隙介质孔压降图

图 7 不同孔径的压降图

Fig. 7 Pressure drop plots for different pore sizes

从图 7 可知:在流体流入阻尼孔的起始阶段,孔径大的压降要大于孔径小的压降;随着流体沿着 X 方向流动,就渐渐变成孔径小的压降大于孔径大的压降。

从图 7(a)和图 7(b)的对比可知:光滑阻尼孔中,流体完全发展的长度介于 0.9177 mm 至 1.03 mm 之间,而带有 PML 的阻尼孔完全发展的长度介于 0.9458 mm 至 1.138 mm 之间。这是因为当流体从管道流入阻尼孔时,由于截面变小,入口处便出现复杂的湍流和涡流,而带有均匀孔隙介质层的阻尼孔更容易产生湍流,从而导致动能的增加,因此,完全发展所需的距离相应更长。

阻尼孔中流动方向的湍流涡旋频率如图 8 所示。

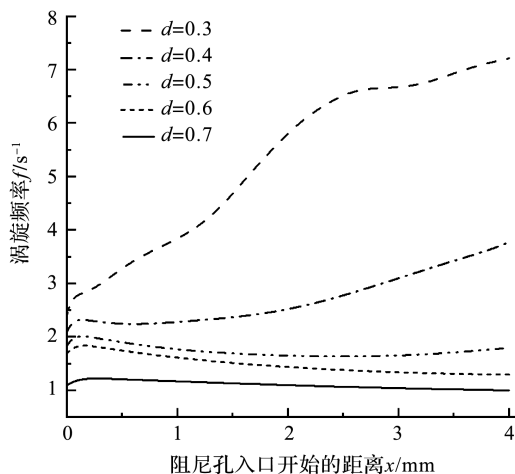


图 8 湍流涡旋频率

Fig. 8 Turbulent vortex frequency

从图 8 可知:入口阶段的湍流涡旋频率都呈上升趋势,湍流涡旋频率(即在湍流流动中涡旋的发生频率)的值越大,代表更多的湍流涡旋运动发生,阻尼孔进口处涡旋显著增多;同时,较大孔径的阻尼孔具有更高的流量和更大的流体惯性,导致更显著的入口损失,从而使得较大孔径的压降增加。

随着流体流动,较小孔径显示出更高的湍流涡旋频率,这导致小直径阻尼孔内的能量耗散更为显著,进而使机械能损失更大;随着涡旋数量的增加,流体层之间以及流体与孔壁的相对运动变得更为剧烈,导致流体摩擦力及能量损失增大。

由此可见,随着流体在阻尼孔中完全发展,较小的阻尼孔压降越大。

此外,笔者在流体复杂运动中考察了流体的宏观动能,部分动能会转换为微尺度上的动能,即湍动能。

阻尼孔中流体的湍动能如图 9 所示。

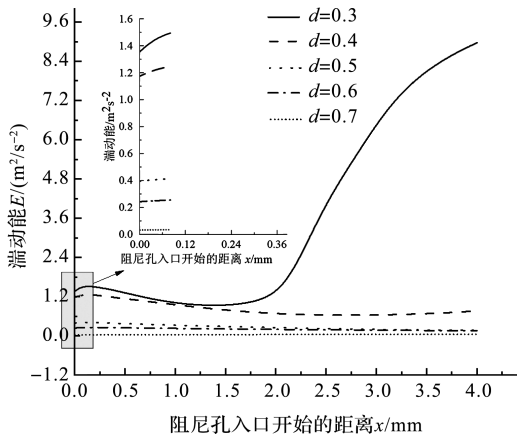


图 9 阻尼孔 X 向中心线的湍动能

Fig. 9 Turbulent kinetic energy of the damping hole X to the centerline

从图 9 中可知:湍动能随着孔径的减小而增大;小孔径下的流体流动更容易受到约束和扭曲,容易形成剧烈的涡旋运动和较大的湍动能;湍动能的增加导致能量耗散增大,进而产生更大的压降。

### 3.3 对温度的影响

笔者在实验台上的换向阀安装阻尼孔,通过实验采集到了温度数据,如图 10 所示。

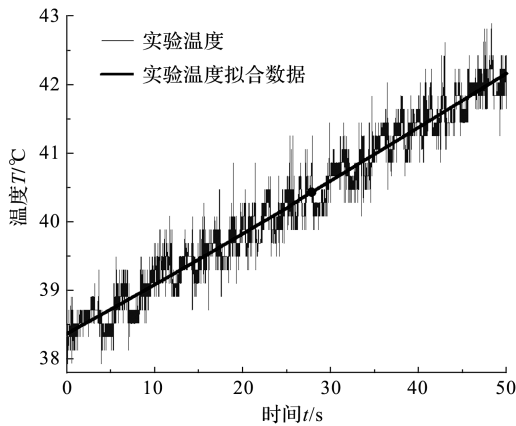


图 10 实验采集的温度数据

Fig. 10 Temperature data collected in the experiment

从图 10 中可知,在 48 s 的时间内,温度由 38.51 °C 上升到 42.23 °C,说明在液压系统中安装阻尼孔后,温升比较明显。

在笔者的仿真试验中,充分考虑了流体的黏性发热。阻尼孔的温度云图如图 11 所示。

从图 11 可知:发热发生在阻尼孔壁面部位,并且随着流体流动方向发热量增大,这是由阻尼孔壁面的不均匀性、流体的非均匀性或流体流动状态的不稳定

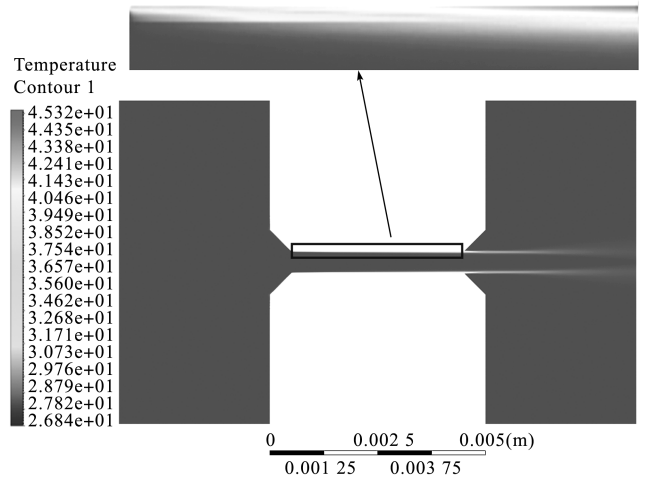


图 11 温度云图

Fig. 11 Temperature contour

性所致。

笔者选择直径为 0.5 mm,进口压力为 3 MPa,出口压力为 0.35 MPa 的阻尼孔进行分析,得到了带 PML 阻尼孔与光滑阻尼孔壁面温度的对比结果,如图 12 所示。

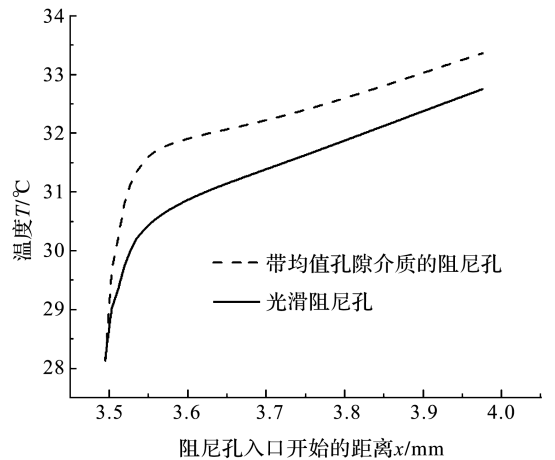


图 12 壁面温度的对比

Fig. 12 Comparison of wall temperatures

从图 12 可知:带 PML 模型阻尼孔的温度比光滑阻尼孔的温度平均高 1.5%。

带 PML 阻尼孔中流体的速度矢量图如图 13 所示。

笔者分析了带有 PML 阻尼孔中温升更高的原因,主要有以下几点:

1) 流体流经管道后,在流入阻尼孔中到离开阻尼孔的过程中,流速沿着流动方向一直处于递增的状态,流速的增加会导致摩擦力的增大;

2) 由于带有 PML 的壁面相较于光滑阻尼孔摩擦更大,发热量相应更大,导致更多的热量累积。

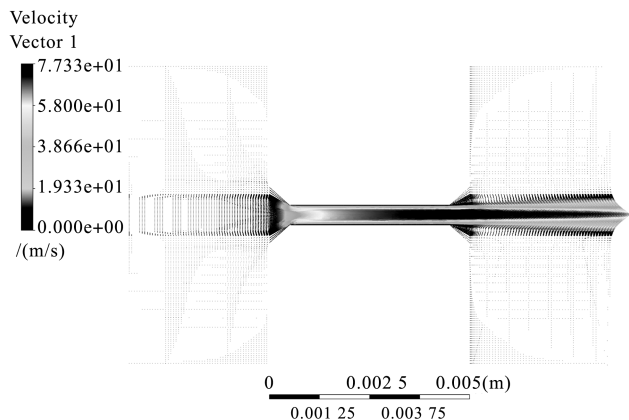


图 13 速度矢量图

Fig. 13 Velocity vector diagram

## 4 结束语

笔者采用 PML 模型研究了阻尼孔壁面摩擦对阻尼孔的影响,通过与文献中的实验结果对比可知,采用 PML 模拟粗糙元的方法具有可行性。

研究结论如下:

1) 通过仿真试验可得,带有 PML 的阻尼孔的压降相较于光滑阻尼孔增大了 2.25%。由此证明,由于粗糙度的存在,阻尼孔所造成的能量损失更大;

2) 对不同孔径的阻尼孔设置相同的边界条件时,在起始段,由于入口效应,孔径大的压降更大;随着流体逐渐完全发展,孔径小的反而压降更大;得到了阻尼孔流体完全发展的流动距离,带有 PML 的阻尼孔比光滑阻尼孔的完全发展距离长 0.1 mm 左右,证明由于粗糙度的存在,使流体需要经过更长的流动长度后才能达到完全发展的流动状态;

3) 在实验平台安装阻尼孔后,温度随着时间增加而升高,温升会导致液压油黏度的变化,从而影响流体的流动特性。笔者在研究中发现,带有均值孔隙介质的阻尼孔的发热量比光滑阻尼孔的热量平均增加了 1.5%,这说明壁面粗糙度会使流体产生更多的热量。

在后续的工作中,笔者将进一步研究阻尼孔的壁面粗糙度对于发热、散热的影响,以及阻尼孔发热对空化的影响。

## 参考文献 (References):

[1] 顾远琪,范立云,苗秋露,等. 高压油泵阻尼孔对燃油系统压力特性的影响研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2024,45(1):1-7.  
GU Yuan-qi, FAN Li-yun, MIAO Qiu-lu, et al. Investigation into the influence of damping orifice of high

pressure fuel pump on the fuel system pressure characteristics [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(1):1-7.

- [2] 赵敏,杨波,李伟. 液压冲击抑制方法研究现状与展望[J]. 中国农机化学报,2023,44(9):123-130.  
ZHAO Min, YANG Bo, LI Wei. Current status and prospects of research on hydraulic impact suppression methods [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(9):123-130.
- [3] 张赞熙. 阻尼孔及单向阀对车辆油气悬架减振特性的影响[J]. 南方农机,2023,54(7):137-140,158.  
ZHANG Yun-xi. Effect of damping holes and check valves on the damping characteristics of vehicle hydro-pneumatic suspension [J]. China Southern Agricultural Machinery, 2023, 54(7):137-140,158.
- [4] 白国庆,贺志凯. 斜盘柱塞泵滑靴短阻尼孔的计算与仿真[J]. 机械工程与自动化,2021,48(1):55-56,59.  
BAI Guo-qing, HE Zhi-kai. Calculation and simulation of short damping orifice for slipper of swash-plate piston pump [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2021, 48(1):55-56,59.
- [5] MALA M, LI D. Flow characteristics of water in microtubes [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1999, 20(2):142-148.
- [6] LI Q. Experimental Investigation of Friction Factor and Heat Transfer for Single Phase Water Flow in Stainless Steel and Nickel Micro-tubes [D]. Faculty of Science and Technology, University of Macau, 2012.
- [7] 王建勇,杨军,雷玫. 管壁局部粗糙对水平超临界二氧化碳湍流传热的影响[J]. 中国电机工程学报,2023,43(23):9214-9224.  
WANG Jian-yong, YANG Jun, LEI Wen. Influence of regional wall roughness on the turbulent heat transfer of horizontal supercritical carbon dioxide flows [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23):9214-9224.
- [8] PENG X F, PETERSON G P, WANG B X. Frictional flow characteristics of water flowing through rectangular microchannels [J]. Experimental Heat Transfer, 1994, 7(4):249-264.
- [9] LALEGANI F, SAFFARIAN M R, MORADI A, et al. Effects of different roughness elements on friction and pressure drop of laminar flow in microchannels [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2018, 28(7):1664-1683.
- [10] PFUND D, RECTOR D, SHEKARRIZ A, et al. Pressuredrop measurements in a microchannel [J]. AIChE Journal, 2000, 46(8):1496-1507.
- [11] 鲁聪达,薛浩,吴化平,等. 随机粗糙微通道内部流动

- 与传质特性[J]. 中国机械工程, 2018, 29(12): 1414-1420.
- LU Cong-da, XUE Hao, WU Hua-ping, et al. Flow and mass transfer characteristics in random roughness surface microchannels[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(12):1414-1420.
- [12] FARIAS M H, CASTRO C S, GARCIA D A, et al. Surface roughness influences on the behaviour of flow inside microchannels[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 975(1):012078.
- [13] 常开忠. 圆环微通道流动特性的理论分析和数值模拟研究[D]. 北京:北京交通大学机械与电子控制工程学院, 2022.
- CHANG Kai-zhong. Characteristics of Annular Microchannels Analytical and Numerical Investigations of Flow[D]. Beijing: School of Mechanical and Electronic Control Engineering, Beijing Jiaotong University, 2022.
- [14] 杨小民, 杨海生, 崔永存, 等. 薄环-紊动射流小孔挤压油膜阻尼器压力特性[J]. 振动与冲击, 2023, 42(9): 151-160.
- YANG Xiao-min, YANG Hai-sheng, CUI Yong-cun, et al. Pressure characteristics of squeeze film damper with thin-walled ring-turbulent jet orifice[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(9):151-160.
- [15] 王传礼, 魏本柱, 邓海顺, 等. 基于 AMESim 卸荷溢流阀阻尼孔优化分析[J]. 机床与液压, 2017, 45(5): 104-107.
- WANG Chuan-li, WEI Ben-zhu, DENG Hai-shun, et al. Optimization analysis of damping hole of unloading relief valve based on AMESim[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(5):104-107.
- [16] 王 跃, 殷红梅, 王海平. 冲压机床多孔式液压缓冲器的阻尼孔设计与分析[J]. 今日制造与升级, 2023, 10(5): 68-70.
- WANG Yue, YIN Hong-mei, WANG Hai-ping. Damping hole design and analysis for porous hydraulic shock absorbers in stamping presses [J]. Manufacture & Upgrading Today, 2023, 10(5):68-70.
- [17] 张 奥. 壁面粗糙度和壁面滑移耦合作用下的微喷孔内空化流动[D]. 大连:大连理工大学能源与动力学院, 2023.
- ZHANG Ao. Cavitation Flow in Nozzle Under Coupling Effect of Wall Roughness and Wall Slip[D]. Dalian: School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, 2023.
- [18] MUDHAFAR M A H, LIN Y. Characterization of heat transfer and frictional pressure drops for water flows through micro tubes [J]. Heat and Mass Transfer, 2023, 59(2): 283-297.
- [19] WUHY, CHENG P. An experimental study of convective heat transfer in silicon microchannels with different surface conditions [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(14):2547-2556.
- [20] 李继平, 商 丽, 王 楠, 等. 基于微凸体多尺度的粗糙分形表面滑动摩擦力建模[J]. 机械设计, 2023, 40(8): 127-134.
- LI Ji-ping, SHANG Li, WANG Nan, et al. Modeling of rough fractal surface sliding friction force based on micro convex multi-scale[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(8):127-134.

#### 本文引用格式:

杨 蕾, 罗 瑜, 罗艳蕾. 基于均值孔隙介质层的阻尼孔壁面摩擦效应研究[J]. 机电工程, 2024, 41(8):1398-1405.

YANG Lei, LUO Yu, LUO Yanlei. Wall friction effect of damping hole based on mean porous medium layer[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2024, 41(8):1398-1405.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>