

文章编号:1005-4642(2020)09-0044-07

学  
生  
园  
地



## 特斯拉阀性能的仿真研究

周润中, 乔宇杰, 张钰翔, 代珍兵

(四川师范大学 物理与电子工程学院, 四川 成都 610101)

**摘 要:**通过 CAD 软件建立几何模型,通过 COMSOL 软件建立数值模型并求解,与实验结果进行对比,并通过数值模拟讨论相关参量对阀门单向流通性的影响. 研究表明:特斯拉阀门适用于低粘度高密度流体;本文所设计的特斯拉阀门在四阀门情况下 dedicatee 数能达到 3.414;单阀门特斯拉阀的性能相较于多阀门更佳.

**关键词:**特斯拉阀;数值模拟;阀门性能;diodicity 数

中图分类号:TH134

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2020.09.009

特斯拉阀是一种被动式流体控制装置<sup>[1]</sup>,结构由直道和弯道构成,该结构设计使正向流动相对于反向流动更加容易,达到控制流动效果. 特斯拉阀能够在各种尺度下正常工作,性能稳定. 由于其可制造性,以及可缩放性,无需能源的特性,现在特斯拉阀门已被运用于微流体控制、微电子机械系统、生物技术和分析化学等领域<sup>[2]</sup>. 在微流体领域中具有广泛的应用前景,被动式阀门相较于主动式阀门具有易于维护的优势,目前关于特斯拉阀的研究主要为确定合适的数值计算模型能够达到计算结果与实验结果契合,为实际应用提供指导. 文献<sup>[3]</sup>表明湍流  $k-\epsilon$  模型对于结果的预测效果较差,而湍流  $k-\omega$ 、湍流 STT  $k-\omega$  模型的计算结果在低雷诺数下与实验契合,在高雷诺数下具有较大误差,但经过一系列修正后可以达到一致,他们的模型是基于 ANSYS FLOTTRAN 进行<sup>[3]</sup>. 最近 QIAN Jinyuan 等人的研究揭示了特斯拉阀同样适用于离子流动<sup>[4]</sup>. 在近几年的研究中常常会出现利用 COMSOL 软件对于流体<sup>[5]</sup>、电场<sup>[6]</sup>、声学<sup>[7]</sup>等不易进行实验的物理现象进行仿真分析,而特斯拉阀门也存在难以进行大量实验的问题. 本文使用 COMSOL 对特斯拉阀进行数值求解,计算结果在一定程度上与实验结果较为契合,并在此基础上讨论了相关参量对阀门性能的影响.

### 1 特斯拉阀的工作原理

#### 1.1 特斯拉阀结构

特斯拉阀由重复的弯道和直管道构成(图 1),当流体分别从阀门两端的入口进入时,流体的流动分布会存在明显的不同(图 2),此现象即为特斯拉阀的单向流通性.

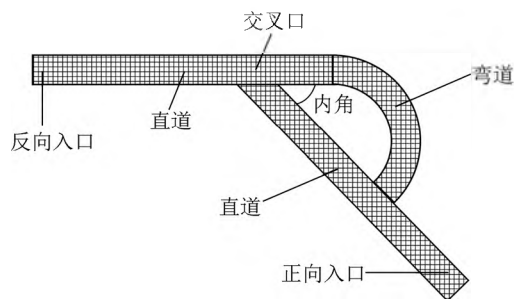


图 1 特斯拉阀的几何结构示意图

从能量的角度看,流体由不同的入口进入特斯拉阀,其能量的局部损失和沿程损失将会不同. 对于沿程损失,在相同流量的情况下,正向流入的流体,其经过直道的流量相对反向流动过程中经过直道的流量更多,能量损失更小,这是引起单向流通性的主要因素;对于局部损失,各交叉口的几何形状不变(见图 2),局部损失仅受到直道与弯道中流量大小不同的影响<sup>[8]</sup>,变化较小,为次要因素.

收稿日期:2019-10-29;修改日期:2020-07-02

作者简介:周润中(1998—),男,四川眉山人,四川师范大学物理与电子工程学院 2016 级本科生.

通讯作者:代珍兵(1986—),男,重庆人,四川师范大学物理与电子工程学院实验师,硕士,从事物理实验仪器的开发与研究工作. E-mail:daizbchina@aliyun.com



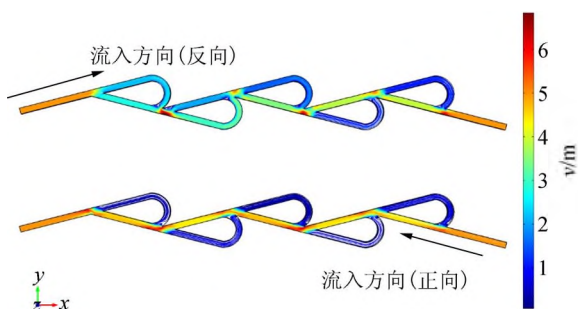


图 2 特斯拉阀的流场示意图

### 1.2 特斯拉阀性能的衡量

衡量阀门的单向流通性,可以用 diodicity 数来描述, diodicity 数与正向流动和反向流动时阀门中的压力势能的损失大小有关. 若认为出口处为压力势能零点, diodicity<sup>[9]</sup>

$$\text{diodicity} = \frac{\Delta p_{\text{rcin}}}{\Delta p_{\text{pcin}}} = \frac{p_{\text{rcin}}}{p_{\text{pcin}}}, \quad (1)$$

其中  $\Delta p_{\text{rcin}}$  为反向入口和反向出口的压强差,  $\Delta p_{\text{pcin}}$  为正向入口和正向出口的压强差,  $p_{\text{rcin}}$  为反向入口处压强,  $p_{\text{pcin}}$  为正向入口处压强.

## 2 模拟与实验设计

### 2.1 实验设计

利用 3D 打印技术制造满足实验条件的特斯拉阀(图 3), 保证阀门瓣数一致, 尺度约为 10 cm.



图 3 特斯拉阀实物与 CAD 透视图示意图

实验装置示意图如图 4 所示, 装置由气泵提供风源, 利用 DISLAB 实验套件中的压强传感器(测量范围 0~700 kPa, 精度 0.1 kPa)测量入口处压强; 利用风速计(测量范围 0~35.0 m/s, 精度 0.1 m/s)测量出口处风速, 并通过伯努利方程进行换算, 得到出口处的流体压强为

$$p_{\text{out}} = p_{\text{大气压}} - \frac{1}{2} \rho v^2. \quad (2)$$

在实验时, 控制流体流速不变, 分别测量正向流动和反向流动时入口与出口的压强差, 达到测量 diodicity 数的目的.

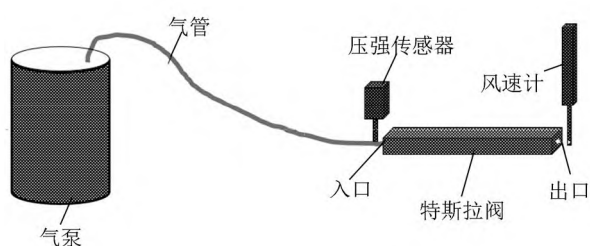


图 4 实验装置示意图

### 2.2 数值模型建立

通过 CAD 软件建立特斯拉阀的几何模型如图 5 所示, 这里展示的特斯拉阀门由 4 瓣构成, 利用 COMSOL 进行网格剖分(见图 6), 网格由三角形网格和四边形网格组成, 保证能够在有限算力下使圆弧更加光滑, 降低计算误差.



图 5 特斯拉阀门几何模型示意图



图 6 计算域网格分布(总 227 576 域单元、26 162 边界单元和 1 991 边单元数)

通过 RANS 湍流  $k-\omega$  模型求解, 其中阀门壁的边界条件为壁函数, 且无通量, 流体考虑为可压缩流体, 并设定出口压强为零, 设定入口流速为所需要探究的流速. 流体采用空气为基本材料, 其密度为  $1.205 \text{ kg/m}^3$ , 黏度为  $1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ .

### 2.3 模拟模型验证

为了确定数值模拟的正确性, 在研究中仅改变特斯拉阀门的内角分别为  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  和  $60^\circ$ , 其中内角所指角度见图 1 所示, 控制其他参量不变, 进行数值模拟和实验, 并将所得数据进行对比, 图 7 分别表示不同角度下正向与反向流动的部分模拟与实验结果对比.

由图 7 可知本实验所得结果与数值模拟结果达到了较好的契合, 由此可知, 在进行实验的流速范围内, 即  $0 \sim 35 \text{ m/s}$ , 数值实验结果能较好地反映出实验中压降随流速变化的趋势. 模型与实验的契合程度取决于雷诺数<sup>[10]</sup>, 因此接下来控制流速和模型尺度在一定范围内, 保持模拟中雷诺数的大小与实验处于同一量级范围.

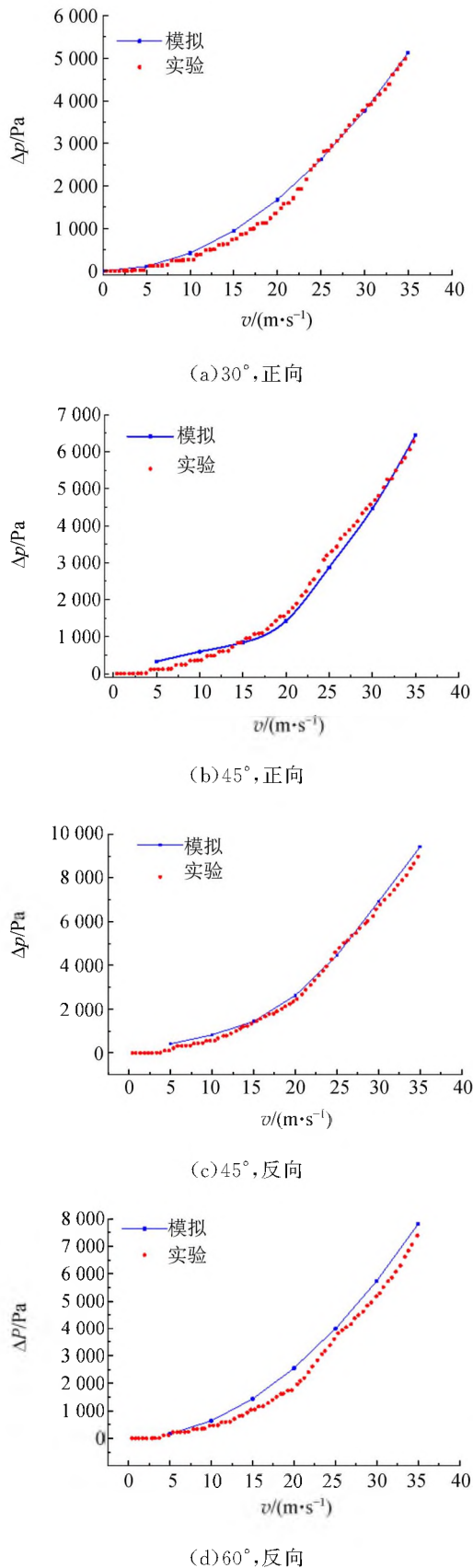


图 7 特斯拉阀构型模拟与实验结果对比

### 3 基于数值模拟讨论相关参量对阀门性能的影响

由于特斯拉阀在实验中的微小误差对 diodicity 数产生较大的波动, 不便于分析特斯拉阀门性能随着相关参量的变化, 因此通过数值模拟分析 diodicity 数随相关参量的变化趋势。

#### 3.1 流体性质对阀门性能影响的数值模拟分析

流体密度和流体黏度反应了流体的基本属性, 是影响流体流动的基本要素。

##### 3.1.1 流体密度对阀门性能影响

对于特斯拉阀门, 弯道和直道的沿程损失可以表示为<sup>[8]</sup>

$$p_{\text{linear}} = \frac{2 f_{\text{sw}} \rho u_w^2 L_y}{D}, \quad (3)$$

其中,  $L_y$  为管长,  $u_w$  为流体速度,  $D$  为开口直径,  $f_{\text{sw}}$  为摩擦系数, 摩擦系数与管的形状有关, 流体在特斯拉阀中的流动考虑为湍流, 对于直管

$$f_{\text{sw}} = \frac{1}{4} \left[ \frac{1}{0.87 \ln \left( \frac{D}{2e_p} \right) + 1.74} \right], \text{ 对于弯管 } f_{\text{sw}} = \frac{1.069 \alpha \left( \frac{D}{2R_c} \right)^{0.1}}{Re_w^{0.5b}}, \text{ 其中 } e_p \text{ 表示壁的粗糙程度, } R_c \text{ 为弯管的曲率半径}^{[11]}.$$

局部损失可用以下公式进行描述<sup>[11]</sup>:

$$p_{\text{local}} = \zeta \frac{\rho u_w^2}{2}, \quad (4)$$

其中,  $\zeta$  为系数, 该系数对于不同结构取不同值,  $u_w$  表示流体速度。

最终整个特斯拉阀的局部损失表述为

$$p_{\text{local}} = \sum_{i=1}^n \zeta_i \frac{\rho u_{wi}^2}{2}. \quad (5)$$

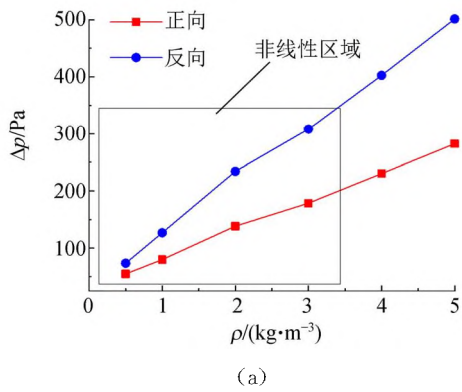
由(3)式和(5)式可以发现特斯拉阀的局部损失与密度无关, 但沿程损失受到密度影响较大。

数值模拟结果如图 8 所示, 图 8(b) 表明随着密度的增大, diodicity 数会趋于定值, 这是由于在低密度时, 局部损失与沿程损失处于相近的量级, 局部损失会对结果产生一定影响. 而在高密度时, 沿程损失远远大于局部损失, 局部损失因素较小, 此时可以认为特斯拉阀的性能取决于沿程损失, 因此 diodicity 数会趋于定值。

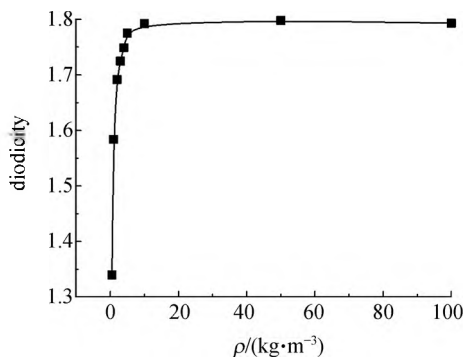
##### 3.1.2 流体黏度对阀门性能影响

在流体黏度的研究中, 控制流体黏度以外的参量均保持不变. 通过模拟结果发现, 随黏度的

变化,在反向流动情况下,弯管的流量和直管的流量均趋于稳定值(图 9)。



(a)



(b)

图 8 流体密度对特斯拉阀门特性的影响

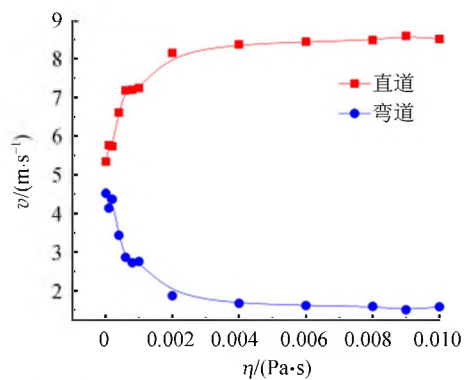
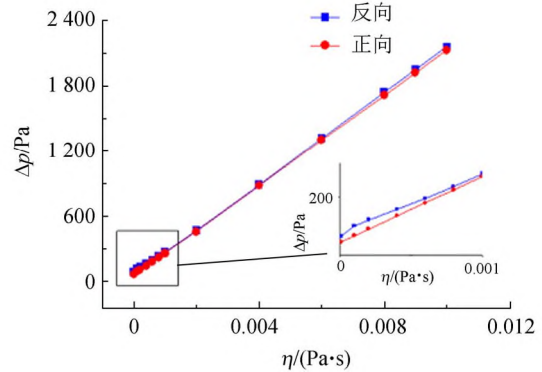


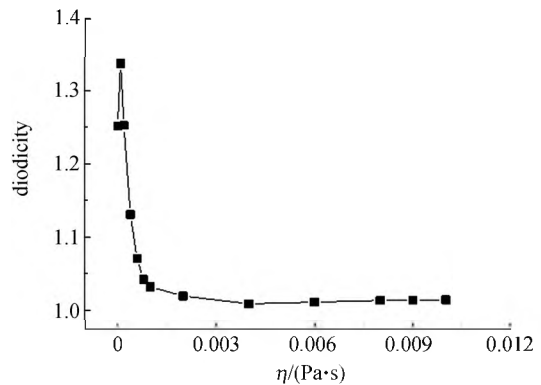
图 9 管道中流速随着液体黏度变化

当流速趋于稳定值时,正向流动与反向流动的流体分布一致,其物理机制是:流体进入弯道时受到由张力产生的阻碍作用,在其他条件相同时,黏度越大的流体,进入弯道受到越大的阻力,流量越小.当流体黏度过大时,弯道中的流体流量趋于零(图 9),导致了正向流动和反向流动的局部损失和沿程损失均趋于一致,diodicity 数将趋于

1,数值模拟结果也出现出这样的结果,如图 10 所示,这表明特斯拉阀门适用于低黏度流体。



(a)



(b)

图 10 随着液体黏度变化,正向和反向的压降变化, diodicity 数的变化

### 3.1.3 流体属性对阀门性能影响

通过对流体的基本参量,即流体密度以及黏度的模拟研究,发现高密度低黏度的流体更适用于特斯拉阀门。

对于高密度的流体可以从能量的角度进行定性分析.对比局部损失表达式即式(5),沿程损失表达式即式(3),发现沿程损失受密度的影响,而局部损失几乎与密度无关,同时正向流动与反向流动的局部损失也无较大差别.随密度增大,沿程损失会占据主导地位,而正向流动与反向流动中流体流动的路程存在较大差距,导致正向流动与反向流动的沿程损失出现较大差距,diodicity 数出现增长,特斯拉阀的单向流通性即性能更好.而在低密度情况下局部损失已经占据了主导地位,沿程损失相对局部损失较低,由于正反向流动的局部损失无较大差别,导致 diodicity 数较低,特斯拉阀不再体现出单向流动的特性,性能较弱。

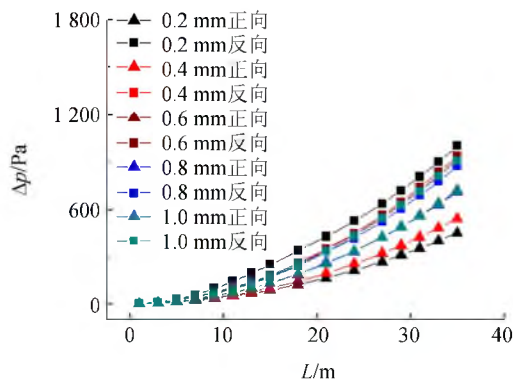
对于低黏度的流体的选择,通过对特斯拉阀门流场的定性分析,可以发现高黏度的流体无论是正向流动还是反向流动,当流体进入弯道时均会受到较大的阻碍,无法正常进入,表现为正向流动与反向流动的路程趋于一致,导致了沿程损失趋于一致,同时局部损失仅有较小的差距,在 diodicity 数上体现为其数值趋于 1,表明在使用高黏度流体时,特斯拉阀门不再体现出单向流动的特性,性能较弱.

### 3.2 阀门几何参量对阀门性能影响的数值模拟分析

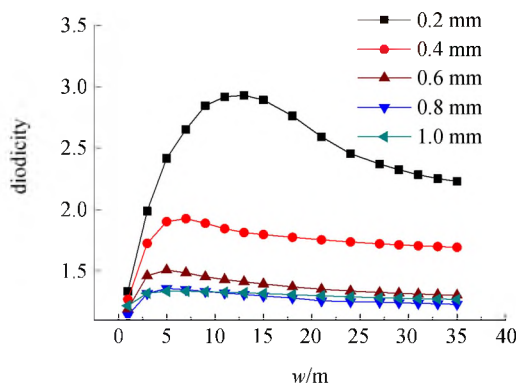
为了寻求具有较好性能且具有实用性的特斯拉阀结构,对高宽比、阀门内角、阀门个数这 3 个参量通过数值模拟进行计算,这 3 个结构参量正是决定特斯拉阀形状的主要参量.

#### 3.2.1 高宽比

在宽为 0.5 mm,角度为 45°,入口流速为 5 m/s 的情况下研究了高度对单阀特斯拉阀门的影响,结果如图 11 所示.



(a)



(b)

图 11 特斯拉阀构型数值模拟宽度变化

由图 11(b)可知在不同的高度下,压降随着黏度的变化具有一致的趋势,而对于不同宽度,其流速具有最大值.在工程运用时可以对不同的模型进行计算,即可确定最佳的高度.

由于单一讨论特斯拉阀门的高度或者宽度并不能决定阀门的实际形状,因此讨论阀门的高度与宽度的比值,通过比值和角度达到表征特斯拉阀形状的目的是很有必要的.

改变高宽比得到的模拟结果如图 12 所示,当高宽比在 0.35 附近时具有最大 diodicity 数 3.14,并且随着高宽比的增加,呈现出降低的趋势,同时高宽比在 1 附近时具有另一较低极值 3.03.

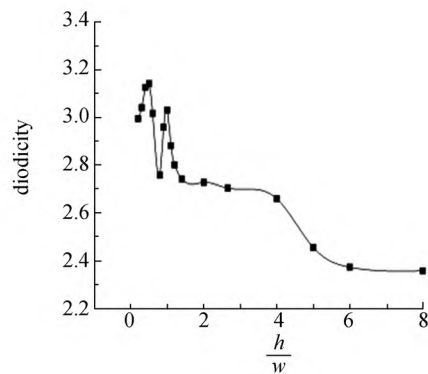
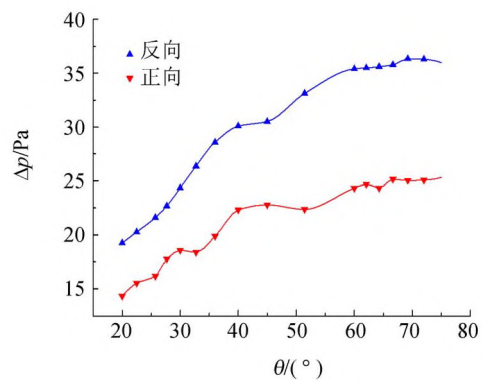


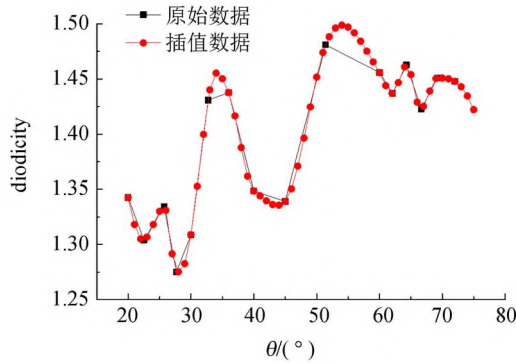
图 12 高宽比的变化时特斯拉阀 diodicity 数的变化

#### 3.2.2 内角

在高为 1.25 mm,宽度为 0.5 mm,入口流速为 1 m/s 的情况下研究了内角对单阀特斯拉阀门性能的影响,结果如图 13 所示,其中横坐标为阀门角度,纵坐标为 diodicity 数,反应特斯拉阀门的性能.



(a)正向(反向)压降随内角的变化



(b) diodicity 数随内角的变化

图 13 插值后的压降与压降比变化规律

使用 COMSOL 软件计算了部分数据, 并采用立方插值的数学方法, 得出正向流动与反向流动的压降随着阀门内角增加的变化曲线如图 13(a), 随着内角的增加压降呈现上升趋势. 将反向流动压降和正向流动压降做比得出 diodicity 数, 如图 13(b), 插值前性能峰值出现在  $52^\circ$ , 插值后性能峰值出现在  $55^\circ$ , 与文献[1]  $48.1^\circ$  结果较为接近.

### 3.2.3 整体尺度

保持特斯拉阀内角  $52^\circ$ , 高宽比 0.35, 阀门个数为 4, 流体为  $25^\circ\text{C}$  下的纯净水, 即保持特斯拉阀形状, 通过的流体属性均不改变, 通过整体缩放特斯拉阀的大小改变特斯拉阀的尺度, 并通过特斯拉阀的整体长度表征尺度大小. 结果如图 14 所示, 随着特斯拉阀尺度的变化, 特斯拉阀的性能会上升, 这是由于特斯拉阀是冲击性阀门, 在低流速微型通道情况下, 流体冲力无法克服流体张力的影响进入弯道, 正反向流动过程中的流动趋势趋于一致<sup>[12]</sup>, diodicity 数趋于 1. 通过模拟发现在工程应用范围内最大压降为 3.414, 在微流体

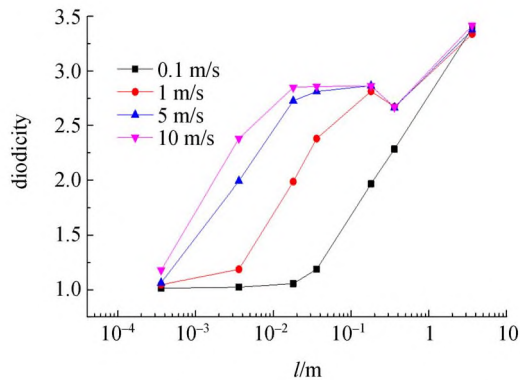
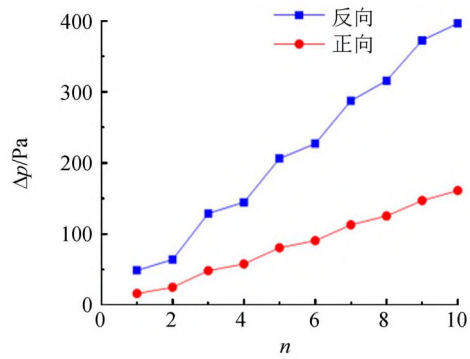


图 14 特斯拉阀阀型尺度对阀门性能的影响

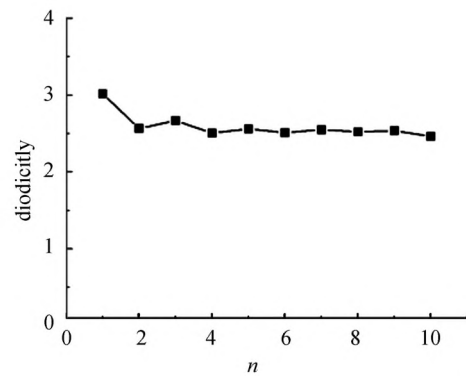
领域 diodicity 数在 2.0~3.0 之间, 具有实际的应用价值.

### 3.2.4 阀门个数

在高 0.5 mm, 宽度 0.5 mm, 入口流速为 1 m/s, 内角为  $60^\circ$  的情况下研究了阀门个数对特斯拉阀单向流通性的影响, 结果如图 15 所示.



(a)



(b)

图 15 特斯拉阀阀门个数变化模拟

图 15 表明特斯拉阀的 diodicity 数受到阀门个数的影响产生了周期性的改变, 呈现出波动的趋势, 与 Piyush R. Porwal 所得结果一致<sup>[13]</sup>. 通过对流场分析, 发现呈现波动变化的原因是因为反向流动在奇偶不同的弯道呈现的流速不同, 导致局部损失与沿程损失不一致. 同时图 15 也表明在单阀情况下, 特斯拉阀的性能最佳.

## 4 结束语

根据实验得到了当使用 RANS 湍流  $k-\omega$  模型时, 能够正确地反映实验结果. 根据数值模拟发现了使用高密度低黏度的流体能更好的体现特斯拉阀的单向流通性, 并从能量角度与动力学角度给出了定性解释. 阀门的几何参量为高宽比为

0.35, 内角为  $52^\circ$ , 尺度为米级, 阀门个数为 1 时阀门性能较佳. 阀门个数为 4 时更适合于实际使用, 且此时的 diodicity 数为 3.414.

致谢: 感谢四川师范大学物理与电子工程学院王涛老师、段满益老师、张原维老师为本课题提出的宝贵建议!

### 参考文献:

- [1] Gamboa A R, Morris C J, Forster F K. Improvements in fixed-valve micropump performance through shape optimization of valves [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2005, 127(2):339.
- [2] McDonald J C, Duffy D C, Anderson J R, et al. Fabrication of microfluidic systems in poly (dimethylsiloxane) [J]. *Electrophoresis*, 2015, 21(1):27-40.
- [3] Westerweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry [J]. *Experiments in Fluids*, 1997, 23(12):1379.
- [4] Qian J, Chen M, Liu X, et al. A numerical investigation of the flow of nanofluids through a micro Tesla valve [J]. *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering)*, 2019, 20(1):50-60.
- [5] 徐文焯, 章可易, 王子静, 等. 超声波气体流量计的时差法检测与数值分析 [J]. *物理实验*, 2018, 38(3):43-46.
- [6] 邱宇, 裴俊乐, 杨德超, 等. 基于 COMSOL 模拟的球形摩擦纳米发电机的发电特性 [J]. *物理实验*, 2017, 37(9):1-5, 11.
- [7] 吴彦达, 王刚, 王彬瑞, 等. 声波层析成像的正演模拟 [J]. *物理实验*, 2020, 40(3):12-17.
- [8] 练波. 连续管流体动力学研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- [9] Liu Z, Deng Y, Lin S, et al. Optimization of micro venturi diode in steady flow at low reynolds number [J]. *Engineering Optimization*, 2012, 44(11):1389-1404.
- [10] Thompson S M, Jamal T, Paudel B J, et al. Transitional and turbulent flow modeling in a tesla valve [C]//ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2013.
- [11] 丁宇奇, 兰乘宇, 刘巨保, 等. 连续管压降计算方法与试验测试 [J]. *石油机械*, 2017, 45(2):96-102.
- [12] Bradell R L. The diodicity mechanism of Tesla-type no-moving-parts valves [D]. Seattle: University of Washington, 2000:19-123.
- [13] Porwal P R, Thompson S M, Walters D K, et al. Heat transfer and fluid flow characteristics in multistaged Tesla valves [J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2018, 73(6):347-365.

## Simulating the performance of Tesla valve

ZHOU Run-zhong, QIAO Yu-jie, ZHANG Yu-xiang, DAI Zhen-bing

(Institute of Physics and Electrical Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China)

**Abstract:** A geometric model was established by CAD software in the calculation, a numerical model was established and solved by COMSOL software and compared with the experimental results. The influence of related parameters on the unidirectional flowability of the Tesla valve was discussed through numerical simulation. The research results showed that the Tesla valve was suitable for low viscosity and high-density fluids. The Tesla valve designed in this paper could reach a diodicity number of 3.414 in the case of four valves. The performance of single-valve Tesla valve was better than that of multiple valves.

**Key words:** Tesla valve; numerical simulation; valve performance; diodicity number

[责任编辑: 郭 伟]