

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306582

多孔孔板流量计结构参数的数值研究

王慧鹏 刘欣荣 张鑫 李浩

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院 上海 201600)

摘要:标准孔板流量计在工业应用中面临着精度和适用性的限制,为了提高其性能,多孔孔板流量计被越来越多的使用。为了研究多孔孔板的结构参数对孔板流量计性能的影响,以内径为40 mm、多孔直径比为0.4、厚度为3 mm的多孔孔板为研究对象,设计了不同孔数和间隙率的多孔孔板模型,并使用数值方法进行了分析。结果表明,多孔孔板流量计的压力损失系数随着孔数的增加而降低,而流量系数则随着孔数的增加而增加。孔隙率对多孔孔板流量计的压力损失系数和排量系数影响不大,但在一定范围内增加孔隙率可以有效降低压力恢复长度。

关键词:多孔孔板流量计;计算流体力学;压力损失系数;流量系数;压力恢复长度

中图分类号: TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Numerical study of structural parameters of the multi-hole orifice flowmeter

Wang Huipeng Liu Xinrong Zhang Xin Li Hao

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China)

Abstract: The standard orifice plate flowmeter faces limitations in accuracy and applicability in industrial applications, and to improve its performance, multi-hole orifice flowmeter is increasingly used. In order to study the influence of structural parameters of multi-hole orifice plate on the performance of orifice plate flowmeter, the multi-hole orifice plate with inner diameter of 40 mm, multi-hole orifice diameter ratio of 0.4 and thickness of 3 mm is used as the research object, and the multi-hole orifice plate model with different number of holes and clearance rate is designed. Numerical methods are used to analyze the flow characteristics of the multi-hole orifice flowmeter. The results show that the pressure loss coefficient of the multi-hole orifice flowmeter decreases with the increase of the number of holes, while the discharge coefficient increases with the increase of the number of holes. The clearance rate has little effect on the pressure loss coefficient and discharge coefficient of multi-hole orifice flowmeter, but increasing the clearance rate in a certain range can effectively reduce the pressure recovery length.

Keywords: multi-hole orifice flowmeter; computational fluid dynamics(CFD); pressure loss coefficient; discharge coefficient; pressure recovery length

0 引言

孔板流量计是一种典型的差压式流量计,它主要通过检测孔板前后的压力差来测量管道中的流量。由于其结构设计简单,无活动部件,可靠耐用,安装维护方便,在工业上得到了广泛的应用^[1]。在当前工业生产中,孔板流量计常用于气体、液体和水蒸气的流量测量。然而,由于流体流经孔板时的摩擦效应和边界层分离现象,标准

孔板流量计面临着压力损失大和测量精度低的问题。此外,由于标准孔板流量计对上游流体状态的变化很敏感,它主要适用于充分发展的流动,通常需要很长的上游直线管道,这也在一定程度上限制了它的使用^[2]。为了提高孔板流量计的性能,多孔孔板流量计在工业中被越来越多的应用。

2004年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)下属的马歇尔航空飞行中心提出一种新型差压式多孔孔板流量计,并在火箭设

计中获得了应用。这种新型流量计具有对称的多孔结构,它不但继承了标准孔板流量计结构简单、无运动部件等优点,且能够平衡调整流场,减少涡流、降低死区效应以及减少流体动能的损失^[3-4]。

多孔孔板流量计相较于标准孔板流量计有着更加优异的性能,其需要更少的上游管道,能耗低,并且能够提供更加精确的流体流量测量^[5]。然而,多孔孔口排列的不确定性和复杂的几何特征使其结构设计和优化变得极为复杂,这极大地限制了其的应用。为了更好地设计多孔孔口流量计,国内外学者进行了广泛的研究并取得了一定的成果。Ma 等^[6]通过实验研究了多孔孔板作为一种新型节流装置的流量系数、压力损失、抗漩涡性能等特点。Zhao 等^[7]提出了多孔孔板的分类方案并进行了实验模拟。Malavasi 等^[8]测试了孔数、尺寸、厚度和雷诺数对多孔孔板压降的影响。Huang 等^[9]对一个特定的多孔孔板进行了实验,并与标准孔板进行了比较。Singh 等^[10]使用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟研究了多孔孔板的流动状态。马有福等^[11]使用数值方法研究了多孔板的孔数和厚度对压力损失系数的影响。Mehmood 等^[12]使用中心复合设计和计算流体力学来评估孔数、直径比和板厚度对压力损失系数的影响。结果显示,压力损失系数是直径比的强函数,流量系数随着孔数的增加而改善。陈虹等^[13]采用数值方法研究了孔板倒角对平衡型低温流量计工作性能影响,他们发现适当开设前倒角可以有效提高流量计的工作性能。而开设后倒角对流量计性能的影响较小。

虽然近年来国内外学者对多孔孔板进行了大量的理论和实验研究,但多孔孔板流量计目前还没有一个通用的设计和使用标准^[14]。本研究的主要目的是研究多孔孔板结构参数对孔板流量计性能的影响。首先,通过与同尺寸规格的标准流量计对比,分析了多孔流量计的流场特性。然后,对具有相同板厚和直径比、不同孔数($N=3,4,5,6$)和间隙比($C_r=0.4,0.5,0.6,0.7$)的 16 个多孔孔板进行 CFD 分析。以压力损失系数、流量系数和压力恢复长度为主要性能参数,分析了孔数和孔分布对多孔孔板流量计性能的影响。研究结果可为多孔孔板流量计的结构设计和优化提供参考。

1 多孔孔板流量计

1.1 结构原理

孔板流量计作为一种常见的节流差压式流量计,主要由一次检测件(节流件)和二次装置(差压变送器 and 流量显示仪)组成。标准孔板流量计的结构原理如图 1 所示,它的主要功能元件是一块中心带有圆形通孔的板件。当上游经过充分发展的流体流经孔板时,孔板上的通孔

会对流体的流动产生节流效果,从而在孔板的上下游位置产生压差,通过测量孔板上下游取压口处的压力差值,经过计算即可获得管道中的流体流量信息。

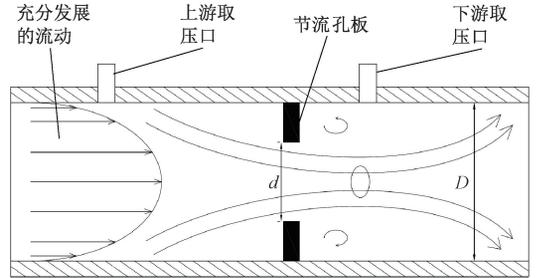


图 1 标准孔板流量计结构原理

Fig. 1 The standard orifice plate flowmeter structure principle

多孔孔板流量计也叫做平衡流量计,其结合了多孔整流器和标准孔板流量计的结构特点,在流量测量方面有着显著的优势。多孔孔板流量计在基本结构和工作原理上与标准孔板流量计类似,二者之间的差异主要在于孔板开孔结构的不同。标准孔板只有 1 个中心通孔,而多孔孔板有着多个对称分布的通孔。以四孔孔板为例,其结构示意图如图 2 所示。其中 D 为管道内径, d 为小孔直径, d_r 为小孔分布的圆周直径, h 为孔板厚度。

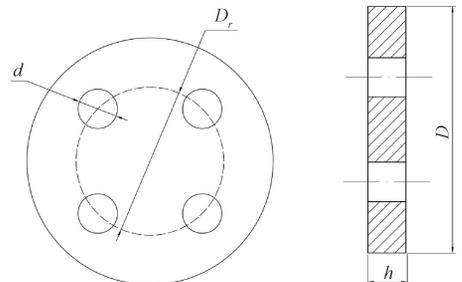


图 2 四孔孔板结构

Fig. 2 Four-hole orifice plate structure

多孔孔板流量计的工作原理主要基于能量守恒定律和质量守恒定律。根据不可压缩流体的连续性方程和伯努利方程,定常流动的流体的体积流量可以通过式(1)、(2)表示:

$$q_v = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi}{4} D^3 \beta^2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (2)$$

式中: q_v 为流体的体积流量, β 为孔板等效直径比; C 为流量系数; ΔP 为孔板上下游取压口之间的压差; ρ 为流体密度。

1.2 性能参数

压力损失系数:由于孔板的节流效果以及孔板与流

体之间的摩擦作用,流体在流经孔板后,湍流强度将会增加,并且产生涡流,导致流体能量的损耗。基于能量守恒定律,流体能量的损失体现为管内流体流经孔板时产生的永久压力损失(简称为压力损失),常用压力损失系数 ξ 来表征压力损失的大小。压力损失系数 ξ 定义为流体的静压损失与动压之比,其公式可以表示为:

$$\xi = \frac{P_a - P_b}{1/2\rho V_m^2} \quad (3)$$

其中, P_a 和 P_b 分别为孔板上、下游压力远场位置处的压强, ρ 是流体介质的密度, V_m 是管道横截面的平均流速。

流量系数:流量系数 C_d 是衡量孔板流量计计量准确性关键指标之一,其定义为实际体积流量与通过孔板的最大流量之比(实际流量和理想流量之比),在孔板两侧写入伯努利方程并进行必要的计算,可以根据孔板两侧的压差获得流量系数 C_d :

$$C_d = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{1}{\beta} \right)^2 \sqrt{1 - \beta^4} \frac{1}{\sqrt{\Delta P^*}} \quad (4)$$

$$\Delta P^* = \frac{\Delta P}{\rho u^2} \quad (5)$$

式中: u 为入口平均流速。

压力恢复长度:压力恢复长度 L 一般是指孔板后方的流体从紊乱的压力波动状态恢复至稳定压力状态所需要的管道长度,对孔板流量计的计量稳定性有着显著的影响。当孔板流量计后方的实际管道长度小于压力恢复长度时,孔板后方的流体状态难以稳定,将对孔板流量计下游取压口处的压力测量造成干扰,进而影响孔板流量计的计量准确性。

2 孔板模型设计

为了探究孔板结构参数对孔板流量计性能的影响,本文以常温水作为流体介质,以某内径为40 mm的流通管道进行分析,建立了如图3所示的数值计算模型。在孔板的长度设置上,Raheem等^[15]研究发现,孔板上游直管长度应当大于 $2D$,然而在 $2D \sim 4D$ 的范围内,孔板上游直管长度对流量计的性能没有明显影响。为了在合理的计算资源下进行模拟,本研究取孔板前长度为 $4D$,孔板后长度为 $10D$ 。上游取压口布置于孔板上游 D 位置处,下游取压口布置于孔板下游 $D/2$ 位置处,采用法兰连接方式取压^[16]。多孔孔板的直径 D 为40 mm,等效直径比 β 为0.4,根据ISO 5167-1:2003,取多孔孔板的厚度为3 mm。多孔孔板的具体结构模型如图4所示,共有16个具有不同结构参数的多孔孔板。孔板的命名格式为 $P_0(N, D_r)$ [N 为孔数, D_r 为间隙率($D_r = d_r/D$)],孔板的结构参数如表1所示。

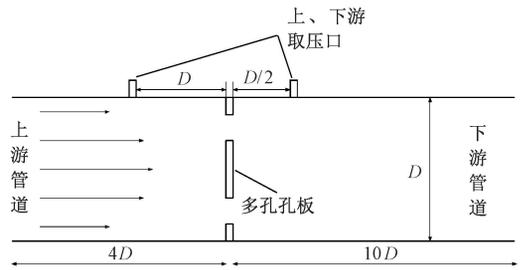


图3 多孔孔板流体域模型

Fig. 3 Multi-hole orifice plate fluid domain model

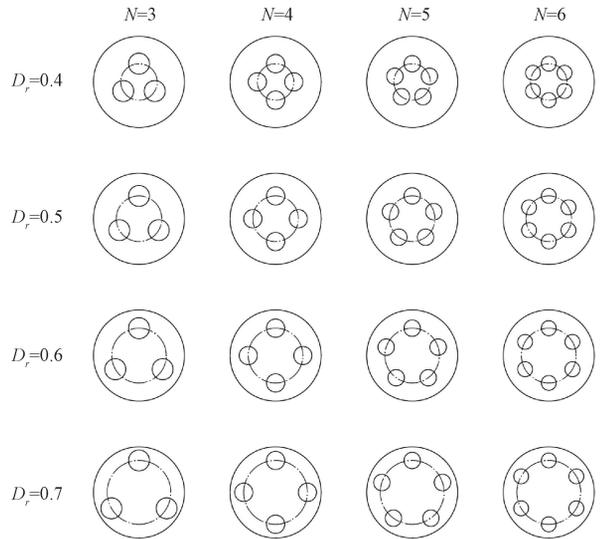


图4 多孔孔板结构设计

Fig. 4 Multi-hole orifice plate structure design

表1 多孔孔板结构参数设计

Table 1 Design of multi-hole orifice plate structure parameters

孔板编号	孔数 N	孔板厚度 h/mm	小孔直径 d/mm	等效直径比 β	间隙率 D_r
P_0	1	3	16	0.4	—
$P_1(3, 0.4)$	3	3	9.24	0.4	0.4
$P_2(4, 0.4)$	4	3	8.00	0.4	0.4
$P_3(5, 0.4)$	5	3	7.16	0.4	0.4
$P_4(6, 0.4)$	6	3	6.53	0.4	0.4
$P_5(3, 0.5)$	3	3	9.24	0.4	0.5
$P_6(4, 0.5)$	4	3	8.00	0.4	0.5
$P_7(5, 0.5)$	5	3	7.16	0.4	0.5
$P_8(6, 0.5)$	6	3	6.53	0.4	0.5
$P_9(3, 0.6)$	3	3	9.24	0.4	0.6
$P_{10}(4, 0.6)$	4	3	8.00	0.4	0.6
$P_{11}(5, 0.6)$	5	3	7.16	0.4	0.6
$P_{12}(6, 0.6)$	6	3	6.53	0.4	0.6
$P_{13}(3, 0.7)$	3	3	9.24	0.4	0.7
$P_{14}(4, 0.7)$	4	3	8.00	0.4	0.7
$P_{15}(5, 0.7)$	5	3	7.16	0.4	0.7
$P_{16}(6, 0.7)$	6	3	6.53	0.4	0.7

3 CFD 计算

3.1 网格划分和网格无关性验证

本研究使用 Fluent Meshing 进行网格划分,主要采用混合型网格。在网格划分的过程中,首先对计算模型进行整体的网格划分,然后采用 BOI (body of influence) 方法对流动较为复杂的孔板核心区域进行了网格局部加密处理。此外,由于在靠近壁面的边界层区域,流体沿壁面的法向速度梯度变化较大。为了更好地预测壁参数并正确捕获速度和压力梯度,本研究还根据 y^+ 值,对孔板周围的壁和区域进行精细的边界层网格划分,如图 5 所示。

$$y^+ = \frac{\rho \Delta y u \tau}{\mu} \quad (6)$$

式中: u_i 是近壁面速度, y^+ 是距离壁面的无量纲距离。

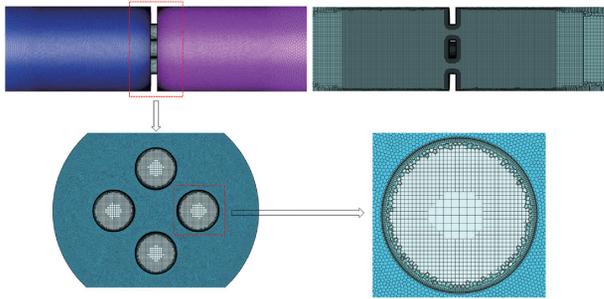


图 5 计算流体域网格划分

Fig. 5 Computational fluid domain grid delineation

网格的疏密程度是影响数值仿真的关键因素,一般来说,在保证网格质量的前提下,网格划分的疏密程度与数值计算的精确度成正相关,但当网格数量增加到一定数量级后,这种影响就会变得十分微小,且过于密集的网格也会导致计算效率的降低,因此进行网格无关性验证,以确定合适的网格数量是十分有必要的^[17-18]。

本文以多孔板 P_2 为例进行网格独立性验证,主要采用五种不同稀疏的网格对 P_2 模型进行数值分析,孔板上下游的压差 ΔP 随网格数量 Z 的变化曲线如图 6 所示。从图中可以发现,随着网格数量 Z 的增加,压差 ΔP 先增大后趋于稳定。当网格数量 Z 大于 500×10^4 后,孔板上下游的压差 ΔP 趋于某一常数,故本研究决定使用大约 500×10^4 的网格密度进行数值计算。

3.2 计算模型

本研究使用 Fluent 求解器来进行数值计算,采用三维稳态不可压缩流动来进行模型的验证,使用流体介质为常温常压水 (300 K, 101 kPa), 密度为 $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 动力粘度为 $1.01 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 雷诺数为 7.9×10^4 。使用无

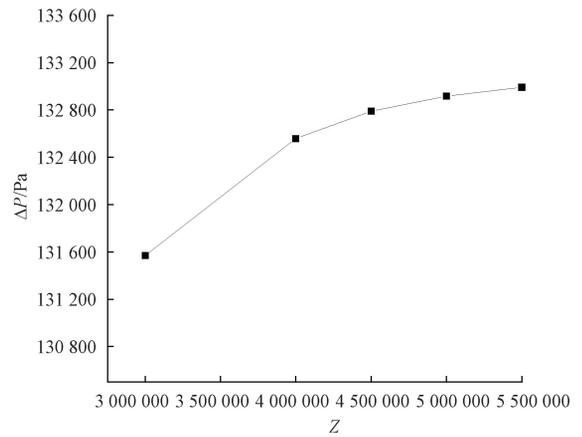


图 6 孔板上下游压差随网格数量的变化曲线

Fig. 6 Differential pressure of upstream and downstream of the orifice plate as a function of the number of grids

滑移壁面边界条件,入口速度设定为 2 m/s 的均匀速度剖面,湍流强度为 5%,湍流粘度比为 10%。出口设置为静压出口,压力为 0 Pa 。方程求解使用 Coupled 算法,压力的空间离散采用 PRESTO!, 动量、湍流动能以及耗散率均采用二阶迎风式。

3.3 控制方程

流体在流经孔板后,由于射流和后台阶流动等现象的出现,在孔板后方的流体流动状态将会变得较为复杂,为了准确的模拟流体的流动状态,本研究采用工程上常用的 Standard $k-\varepsilon$ 湍流模型来进行数值计算。Standard $k-\varepsilon$ 湍流模型由 Launder 等^[19] 提出,是 Fluent 中工程流场计算的主要工具之一。Standard $k-\varepsilon$ 湍流模型在关于湍流动能 k 方程的基础上,再引入一个关于湍流动能耗散率 ε 的方程,形成 $k-\varepsilon$ 两方程模型。

Standard $k-\varepsilon$ 湍流模型已经被广泛的应用于对孔板流量计流量进行 CFD 预测,并且已经取得了较好的成果^[20-22]。其基本公式如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (7)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \times U) = \nabla \cdot (-p\delta + \mu(\nabla U + (\nabla U)^T)) + S_M \quad (8)$$

式中: ρ 是流体密度, T 是时间, U 是流体速度矢量, δ 是识别矩阵, μ 是流体动力粘度, p 是静压, S_M 是动量源项。

$k-\varepsilon$ 方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U\varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (10)$$

式中： k 为湍流动能， ε 为湍流能量耗散率， $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 σ_k 和 σ_ε 为标准 k - ε 湍流模型常数， μ_t 是湍流粘度。

3.4 模型验证

CFD 的验证和可信度评价影响着数值计算结论的正确性，在国内外一直受到高度重视。为了验证本研究中 CFD 数值计算结果的可信度，本研究在孔板中心轴线后方距离为 D 处设置了监测点，用于判断数值计算的收敛效果。以孔板 P_4 为例，图 7 展示了孔板 P_4 在监测点处的最大速度随迭代代数的变化曲线。从图上可以看出，随着迭代步数的逐渐增加，监测点处的最大速度数值最终趋于稳定。因此，可以认为数值计算结果收敛。

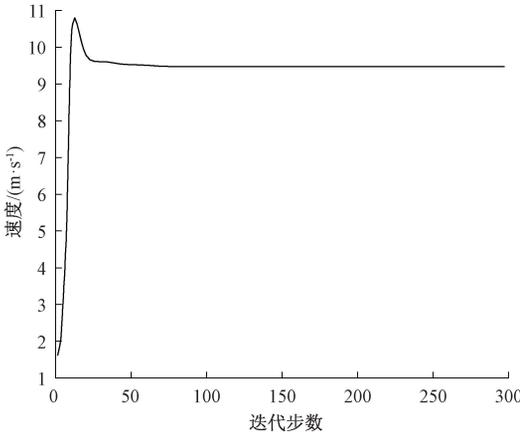


图 7 孔板监测点 P_4 处的速度迭代曲线

Fig. 7 Velocity iteration curve at monitoring point P_4 of the orifice plate

此外，为了进一步验证数值计算模型的准确性，本研究还将标准孔板的数值计算结果与 Shah 等^[23]的研究结果进行了部分对比。在本次对比验证中，针对本研究的计算模型及网格划分方式，采用了与 Shah 等^[23]完全相同的边界条件进行数值分析。图 8 和 9 分别为孔板中心轴线上的速度与压力分布曲线。孔板中心轴线上的速度和沿管道的压力代表了整个解域中流体状态的变化。此外，在孔板的后方区域，由于流体的速度梯度大且存在旋转流动，中心轴线上的速度和压力变化剧烈，是计算域中最重要的区域。因此，在这些区域的结果有效性得到确认的情况下，可以说整个解域中的流动得到了准确的模拟^[1]。从图中可以看出，通过本模型计算出的孔板中心轴线上的速度和压力分布与 Shah 等的计算结果基本一致，因此，可以认为本模型的计算结果是有效的。

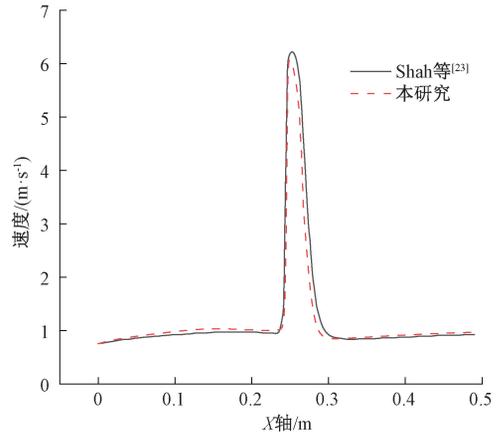


图 8 本研究的中心轴线速度分布曲线与 Shah 等^[23]的结果的比较

Fig. 8 Comparison of the central axis velocity distribution curve of the present study with the results of Shah et al^[23]

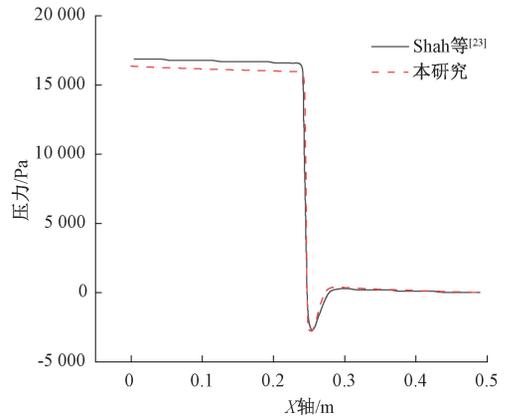


图 9 本研究的中心轴线压力分布曲线与 Shah 等^[23]的结果的比较

Fig. 9 Comparison of the central axis pressure distribution curve of the present study with the results of Shah et al^[23]

4 结果与讨论

4.1 流场特性分析

流体在流经节流孔板的过程中，流动状态将会发生巨大的变化。在上游的层流靠近孔板时，由于小孔的节流作用，流通截面急剧变化，流体的速度逐渐增加而压力则开始降低。当流体通过孔板后，由于射流作用，流体的速度将会迅速增加，动能增大。流体逐渐从层流状态向湍流发展。基于能量守恒定律，流体的压力降低，压力势能减小。在孔板后方的收缩截面处，流体的速度达到最大值，而压力降低至最小值。在收缩截面后方，流体的速度逐渐降低，压力升高，并最终趋于稳定。图 10 和 11 分

别展示了标准孔板流量计 P_0 中轴面上的压力和速度分布,从图上可以看出流体在流经孔板前后的压力和速度变化趋势。



图 10 孔板流量计 P_0 轴向平面的压力云图

Fig. 10 Axial plane pressure contour of orifice flowmeter P_0

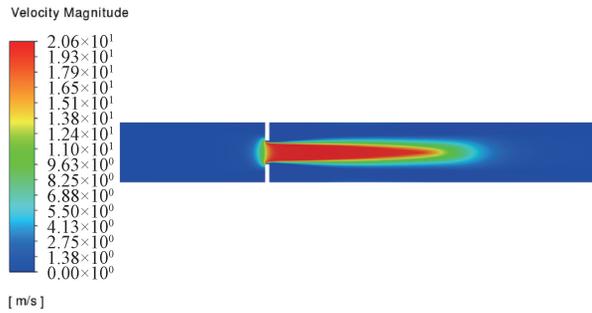


图 11 孔板流量计 P_0 轴向平面的速度云图

Fig. 11 Axial plane velocity contour of orifice flowmeter P_0

图 12 和 13 显示了多孔板流量计 P_4 中心轴上的速度和压力分布。通过与标准孔板流量计 P_0 比较可以发现,与标准孔板流量计相比,多孔板流量计在孔板前后的流体状态变化更加缓慢,压力和速度的波动幅度都有明显的减小,流体通过小孔时形成的射流的强度和影响范围都有明显的减小。



图 12 孔板流量计 P_4 轴向平面的压力云图

Fig. 12 Axial plane pressure contour of orifice flowmeter P_4

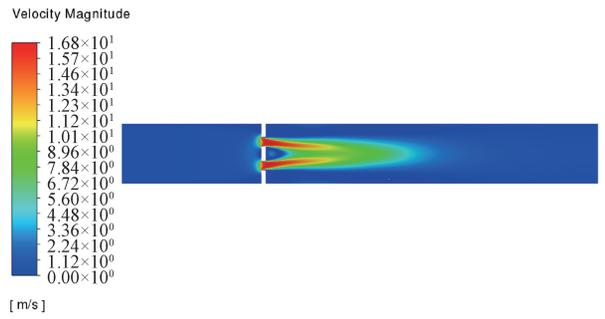


图 13 孔板流量计 P_4 轴向平面的速度云图

Fig. 13 Axial plane velocity contour of orifice flowmeter P_4

量计沿轴线上的压力分布曲线,对于标准孔板 P_0 为孔板中心轴线,而对于多孔孔板,由于本研究所设计的多孔孔板均不含中心通孔,因此这里主要研究小孔中心轴线上的流体参数信息。从图上可以看出,在相同的工况下,流体在通过标准孔板 P_0 时的上游压力更高,而下游射流压力更低,多孔孔板的上下游压降相较于标准孔板更小,约为标准孔板的 65.76%。此外,对于拥有相同间隙比 C ,和不同孔数 N 的多孔孔板进行分析,可以发现随着孔板数 N 的增加,孔板上下游之间的压降逐步降低。以具有相同间隙率 C_r 的多孔孔板 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 为例,相比于 P_1 、 P_4 上下游之间的压差降低了约 5.68%。

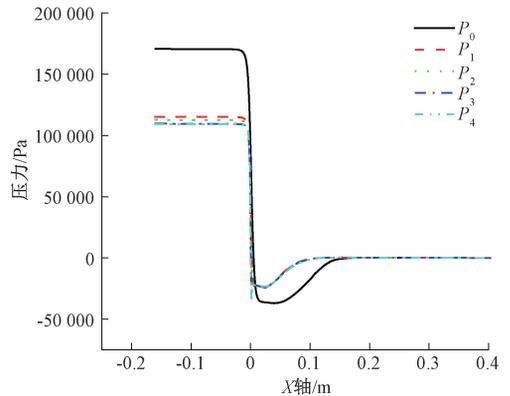


图 14 孔板流量计沿轴线的压力分布曲线

Fig. 14 The velocity distribution along the axis of the orifice flowmeter

图 15 显示了标准孔板流量计 P_0 和多孔孔板流量计 $P_1 \sim P_4$ 沿轴线上的速度分布曲线。从图上可以看出,在相同工况下,标准孔板流量计流经通孔时形成的射流流速更快,且流速达到最大后,先经过了一段平缓的下降阶段,而后迅速降低。而当流体流经多孔孔板时,流速在达到最大值后均迅速降低,射流的最大流速相比于标准孔板有明显的降低,多孔孔板 P_4 的最大流速相比于标准孔板降低了约 21.68%。此外,通过对多孔孔板流量计孔数

图 14 显示了标准孔板流量计 P_0 和部分多孔孔板流

N 的分析可以发现,对于间隙率 C_r 相同的多孔孔板流量计,其最大射流速度随孔数的增加而降低。

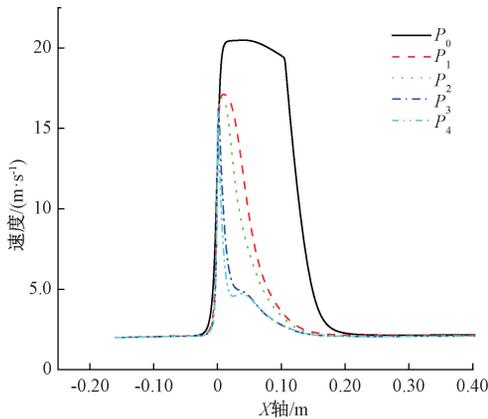


图 15 孔板流量计沿轴线的速度分布曲线
Fig. 15 The pressure distribution along the axis of the orifice flowmeter

图 16 显示了多孔孔板流量计 P_4 、 P_8 、 P_{12} 和 P_{16} 在轴向平面和 $D/2$ 横截面上的速度云图。从图 16 可以看出,当多孔孔板的间隙率 C_r 较小时,多股平行射流之间出现了较长距离的混合,随着间隙率 C_r 的增大,平行射流的混合距离逐渐减小,并且当间隙率 C_r 增大到一定程度时,平行射流不再混合。而随着间隙率 C_r 的继续增大,由于康达效应,孔板后方的射流逐渐向管道壁面靠近,流体的速度和压力产生了明显的波动。

4.2 压力损失系数分析

流体流经孔板后的永久压力损失是影响孔板流量计性能的重要参数,同时也决定着孔板流量计的节能特性。其主要包括流体入口处的流动阻力(即多孔孔板本身造成的局部压力损失)、多孔孔板下游区域流场中的涡流消耗的能量和管道内壁面处的沿程压力损失,研究中通常使用压力损失系数 ξ 来衡量孔板流量计的压力损失特性。

图 17 显示了不同结构的多孔孔板流量计的压力损失系数 ξ ,从图中可以看出,本研究中所设计的 16 种不同结构的多孔孔板流量计的压力损失系数 ξ 均处于 52~58 之间,压力损失系数 ξ 随着孔板孔数的增加而降低。当间隙率 D_r 分别为 0.4、0.5、0.6 和 0.7 时,随着多孔孔板孔数 N 由 3 增加到 6,压力损失系数分别降低了 5.195%、7.504%、6.604% 和 7.824%。而孔板的间隙率 C_r 对孔板流量计的压力损失系数 ξ 没有明显的影响。

4.3 流量系数分析

流量系数 C_d 是衡量孔板流量计计量精度的关键指标,对孔板流量计的设计与使用具有重要意义。从图 18 可以看出,多孔孔板流量计的流量系数 C_d 随着孔数 N 的增加而增大,并且随着孔数 N 的增加,流量系数 C_d 的增大趋势逐步放缓。这主要是因为随着孔数 N 的增加,孔板后涡流的尺寸减小,但同时涡流的数量增加。图中在不同间隙率下,多孔孔板孔数 N 由 3 增加到 6 时,流量系数 C_d 分别增加了 3.314%、5.081%、4.835% 和 5.52%。

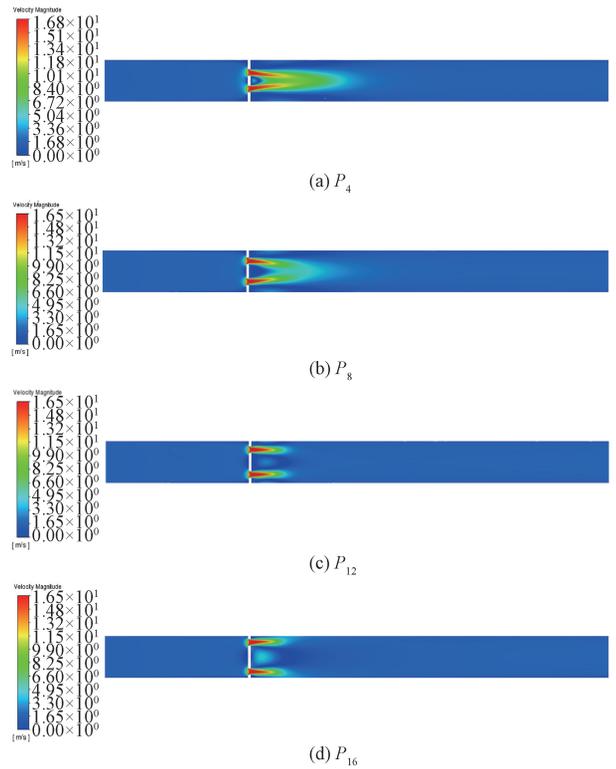


图 16 多孔孔板 P_4 、 P_8 、 P_{12} 和 P_{16} 在轴向平面和下游 $D/2$ 处横截面的速度云图
Fig. 16 Velocity clouds of multi-hole orifice plates P_4 , P_8 , P_{12} and P_{16} in the axial plane and in cross-section at $D/2$ downstream

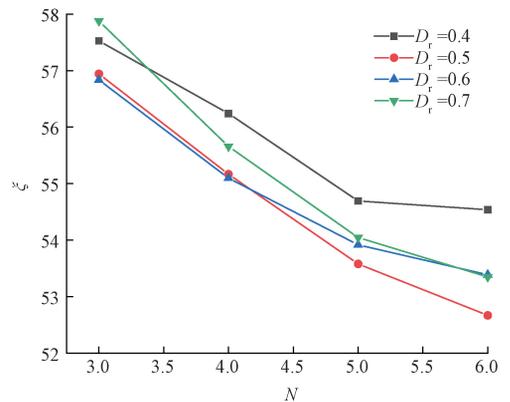


图 17 多孔孔板流量计的压力损失系数变化曲线
Fig. 17 Pressure loss coefficient change curve of multi-hole orifice plate flowmeter

所以适当增加多孔孔板流量计的孔数 N 可以有效的提高多孔孔板流量计的流量系数 C_d 。

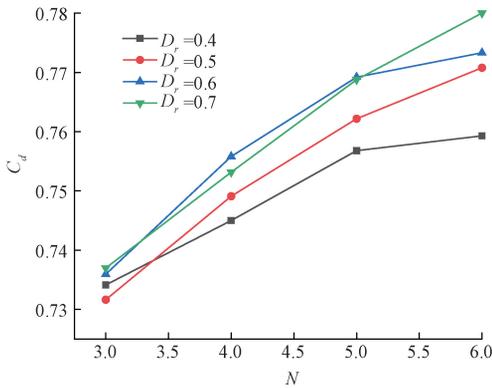


图 18 多孔孔板流量计的流量系数变化曲线
Fig. 18 Discharge coefficient change curve of multi-hole orifice plate flowmeter

4.4 压力恢复长度

在孔板流量计的安装布局中,压力恢复长度是一个不可忽略的影响因素。当孔板流量计下游的实际管长小于孔板的压力恢复长度时,将会对孔板流量计的计量准确性产生干扰,因此对压力恢复长度的探究是很有必要的。

图 19 为多孔孔板流量计的压力恢复长度变化曲线,从图中可以看出,整体上多孔孔板流量计的压力恢复长度随着间隙率 C_r 的增大呈先减小后增大的趋势。这与图 16 中不同间隙率 C_r 的多孔孔板速度云图的特点相吻合。当间隙率 C_r 较小时,通孔间的距离较近,通过多孔孔板的多股射流之间相互扰动,湍流强度较大,因而压力恢复长度较长。当间隙率 C_r 增加时,通孔间的距离增大,射流之间的扰动影响降低,压力恢复长度缩短。但当间隙率进一步增大时,通孔距离壁面较近,由于康达效应,孔板后方的射流向壁面靠近,壁面附近的边界层流动变得不稳定,流体的压力进入波动状态,压力恢复长度快速增加。

5 结论

多孔孔板流量计对于流体状态有较好的调节作用。从流体的压力波动情况压来看,多孔孔板流量计上下游之间的压差相较于标准孔板有着明显的降低,约为相同工况下标准孔板流量计的 2/3。从流体速度波动的方面来看,流体在通过多孔孔板流量计后所形成的最大射流速度,相较于标准孔板降低了约 1/5。而对于具有不同孔数的多孔孔板流量计,其速度和压力的波动情况同样存在差异,上下游之间的压力差和最大射流速度均随着

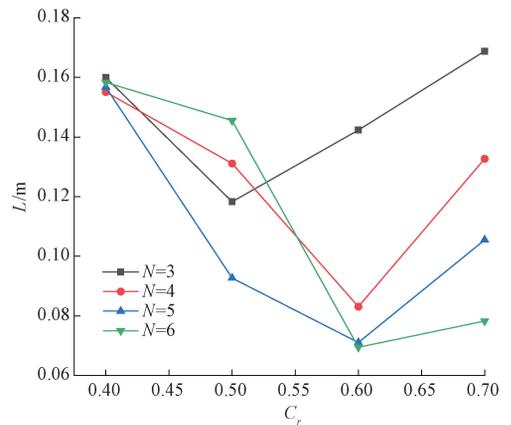


图 19 多孔孔板流量计压力恢复长度变化曲线
Fig. 19 Pressure recovery length change curve of multi-hole orifice plate flowmeter

孔板孔数的增加而降低。

压力损失系数和流量系数是影响孔板流量计性能的重要参数,反映了孔板流量计的节能性能和计量精度。在相同工况下,适当的增加多孔孔板孔数,可以有效的降低多孔孔板流量计的压力损失系数,提高多孔孔板流量计的流量系数。而间隙率对多孔孔板流量计的压力损失系数和流量系数没有明显的影响。

多孔孔板的间隙率对孔板后方的压力恢复长度存在着一定影响。随着多孔孔板间隙率的增大,流体穿过孔板后的射流混合逐渐减弱,射流的最大速度和持续范围均会明显减小,进而使孔板后方的压力恢复长度缩短。但当多孔孔板的间隙率过大时,孔板后方的射流由于康达效应,依附于管道内壁面,将产生较长的压力恢复长度,在多级孔板的设计中应该予以考虑。

参考文献

[1] MOOSA M, HEKMAT M H. Numerical investigation of turbulence characteristics and upstream disturbance of flow through standard and multi-hole orifice flowmeters[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2019, 65: 203-218.

[2] 于洪仕,张涛,葛利俊. 多孔孔板流出系数和压力损失的影响因素[J]. 化工自动化及仪表,2016,43(1):20-22,88.

YU H SH, ZHANG T, GE L J. Influencing factors for discharge coefficient and pressure loss of multi-hole orifice plate [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2016,43(1):20-22,88.

[3] 赵奇,牛志娟,杨雪峰. 基于 CFD 的非标准孔板流量计的数值模拟 [J]. 节能技术, 2015, 33 (5): 453-456,463.

ZHAO Q, NIU ZH J, YANG X F. Numerical simulation

- of the non-standard orifice flowmeter based on CFD[J]. Energy Conservation Technology, 2015, 33 (5): 453-456,463.
- [4] 郝彩哲,宋晓明,王东,等. 对称多孔孔板差压式流量计计量性能试验研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020,34(5):174-180.
- HAO C ZH, SONG X M, WANG D, et al. Experimental study on measurement performance of symmetrical multi-hole orifice pressure differential flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5):174-180.
- [5] RAHEEM A, SIDDIQI A S B, IBRAHIM A, et al. Experimental study on effects of geometric and hydrodynamic parameters on performance of multi-holed orifice flowmeters[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2021, 127: 17-22.
- [6] MA T, WANG D, ZHANG B, et al. Experimental on metering characteristics of multi-hole orifice [J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31(2): 126-130.
- [7] ZHAO T, ZHANG J, MA L. A general structural design methodology for multi-hole orifices and its experimental application [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25: 2237-2246.
- [8] MALAVASI S, MESSA G, FRATINO U, et al. On the pressure losses through perforated plates [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2012, 28: 57-66.
- [9] HUANG S, MA T, WANG D, et al. Study on discharge coefficient of perforated orifices as a new kind of flowmeter[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 46: 74-83.
- [10] SINGH R K, SINGH S N, SESHADRI V. CFD prediction of the effects of the upstream elbow fittings on the performance of cone flowmeters [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2010, 21 (2): 88-97.
- [11] 马有福,王凡,吕俊复. 孔数与孔厚对多孔板压损系数的影响机理[J]. 化工进展, 2020, 39 (2): 446-452.
- MA Y F, WANG F, LYU J F. Influencing mechanism of orifice number and thickness on pressure loss coefficient of multi-orifice plates [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(2): 446-452.
- [12] MEHMOOD M A, IBRAHIM M A, ULLAH A, et al. CFD study of pressure loss characteristics of multi-holed orifice plates using central composite design [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2019, 70: 101654.
- [13] 陈虹,高旭,王洁,等. 孔板倒角对平衡型低温流量计工作性能影响的数值分析[J]. 推进技术,2020, 41(2): 423-430.
- CHEN H, GAO X, WANG J, et al. Numerical analysis of orifice chamfer effects on performance of balanced flowmeter for cryogenic fluids[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(2): 423-430.
- [14] UREVI M, BUKUROV M, TAŠIN S, et al. Numerical study of single-hole and multi-holes orifice flow parameters [J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2020, 14(1): 215-226.
- [15] RAHEEM A, SIDDIQI A S B, IBRAHIM A, et al. Evaluation of multi-holed orifice flowmeters under developing flow conditions-An experimental study [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, 79: 101894.
- [16] GOLIJANEK-JEDRZEJCZYK A, MROWIEC A, KLESZCZ S, et al. A numerical and experimental analysis of multi-hole orifice in turbulent flow [J]. Measurement, 2022, 193: 110910.
- [17] SINGH V K, THARAKAN T J. Numerical simulations for multi-hole orifice flow meter[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2015, 45: 375-383.
- [18] VEMULAPALLI S, VENKATA S K. Parametric analysis of orifice plates on measurement of flow: A review[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2022, 13(3): 101639.
- [19] LAUNDER B E, SPALDING D B. The Numerical Computation of Turbulent Flows [M]. Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion. Pergamon, 1983: 96-116.
- [20] ARAOYE A A, BADR H M, AHMED W H. Investigation of flow through multi-stage restricting orifices [J]. Annals of Nuclear Energy, 2017, 104: 75-90.
- [21] 宋晓明,贾志宁,杨洋,等. 一种对称多孔孔板差压式流量计设计[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(6): 33-38.
- SONG X M, JIA ZH N, YANG Y, et al. A symmetrical multi-hole orifice pressure differential flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018,32(6): 33-38.
- [22] 李浩冉,刘磊,张则亮,等. 孔板压降的内角影响机理分析及计算公式改进[J]. 流体机械,2022,50(11): 54-60.
- LI H R, LIU L, ZH Z L, et al. Mechanism analysis and calculation formula improvement of orifice plate pressure drop affected by inner angle[J]. Fluid Machinery, 2022, 50(11):54-60.

- [23] SHAH M S, JOSHI J B, KALSI A S, et al. Analysis of flow through an orifice meter: CFD simulation [J]. Chemical Engineering Science, 2012, 71: 300-309.

作者简介



王慧鹏, 2017 年于辽宁科技大学机械工程与自动化学院获得学士学位, 现为上海工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为流体机械。

E-mail: 18338555640@163.com

Wang Huipeng received his B. Sc. degree in 2017 from University of Science and Technology Liaoning, School of Mechanical Engineering & Automation. Now he is a M. Sc. candidate in Shanghai University of Engineering Science. His main research interest includes fluid machinery.



刘欣荣 (通信作者), 2019 年获上海理工大学博士学位, 现任上海工程技术大学讲师, 主要研究方向为特种装备机器人设计及动态性能研究、液压元件流固耦合特性研究、齿轮精密加工及动态性能研究。

E-mail: lxr4849@126.com

Liu Xinrong (Corresponding author) received a Ph. D. degree from the School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Technology in 2019. He is now a lecturer in Shanghai University of Engineering Science. His main research interests include the design and dynamic performance analysis of specialized equipment robots, flow-solid coupling characteristics of hydraulic components, and gear precision machining and dynamic performance analysis.