

节流孔板空化特性分析

俞轲鑫¹ 尚群立¹ 吴 欣²

1. 浙江工业大学信息工程学院,杭州,310012
2. 杭州电子科技大学机械工程学院,杭州,310018

摘要:管道系统中的各类阀门、文丘里管、孔板等节流件,随系统工作压力和前后压差的增大,会出现气液两相流引起的空化或发生阻塞流,对系统的工作性能和安全造成严重影响。针对以不同规格孔板为代表的节流件,采用理论推导和 FLUENT 流体力学两相流仿真,结合实验台架所得的空化流动特征,辅以对局部空化气泡的高速微距拍摄结果,提出了斜梯三角形流量曲线以表达节流孔板阻塞流发展变化的全部过程,充分表达了阻塞流发展过程中的局限性特征和阶梯性特征。

关键词:节流孔板;空化特性;计算流体动力学仿真;阻塞流;微距摄影

中图分类号:TK9

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2021.03.006 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Analysis of Cavitation Characteristics for Orifice Plates

YU Kexin¹ SHANG Qunli¹ WU Xin²

1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310012
2. College of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, 310018

Abstract: With the increase of system working pressure as well as before and after differential pressure, cavitation or blocking flow caused by vapor-liquid two-phase flow might occur in various valves, venturi tubes, orifice plates and other throttling parts in the piping systems, which might seriously affect the working performances and safety of the system. For the throttling parts represented by orifice plates of different specifications, with the applications of theoretical derivation as well as FLUENT fluid mechanics two-phase flow simulation, combined with cavitation flow characteristics of cavitation bench test, supplemented by the high-speed macrophotography results of local cavitation bubbles, and the flow curves of ramp ladder triangle were presented to express the whole processes of the development and change of blocking flow occurring in the orifice plates, which fully expressed the limitation and step characteristics of blocking flow in the development processes.

Key words: orifice plate; cavitation characteristic; computational fluid dynamics (CFD) simulation; blocking flow; macrophotography

0 引言

在调节阀工作过程中,当阀前后压差增大到一定程度时,流量系数呈现非线性变化,进而达到极限流量,进入阻塞流状态,同时,管道空化气蚀、噪声、振动^[1]显著加剧,从而对阀门流通能力和结构安全造成重要影响,因此深入研究阻塞流的发展过程对系统高效安全运行具有重要的意义^[1-2]。调节阀、文丘里管、节流弯管对管道系统而言本质上就是一个流阻元件,对应着不同的流通特性,以调节阀为例,其不同开度对应不同的流阻特性。

本文以节流孔板为节流件,选取不同规格的节流件,来模拟调节阀不同开度下的流阻特性。

对于管道系统,阻塞流通常采用流量作为主要参数进行判定。工程中常用的阻塞流测定方法是:保持阀前压力不变,降低阀后压力,管道通过的流量逐渐达到极限,此后,即使继续降低阀后压力,流量仍保持不变。在阻塞流发展过程中,存在两个显著的阶段,一是流量随 $\sqrt{\Delta p}$ 增大而线性变化阶段,二是达到极限流量后的水平阶段。线性变化阶段和水平阶段之间为流量的非线性变化阶段。当介质为水时,阻塞流与管道内水空化导致的液气两相流有关^[3-4]。

阻塞流过程中的流量线性阶段和水平阶段与

收稿日期:2019-10-25
基金项目:国家科技重大专项(2018ZX06005002-003-001);国家自然科学基金(61174108)

管道空化程度有重要的关系。ABDULAZIZ^[3]研究了空化文丘里管中的阻塞流发展过程,实验表明流量随阀后压力下降而达到极限流量,且流量曲线的线性阶段与水平阶段的过渡区域基本没有显著的非线性变化,也就是随阀后压力下降,流量曲线表现为两根相交的直线。ZHANG 等^[4]研究了文丘里管道内阻塞流过程,认为阻塞流包括机械阻塞阶段和空化阻塞阶段两个阶段。上述研究侧重于研究阻塞流的空化特征,明确研究空化与节流件流量特性关系的工作相对较少。

对于阻塞流中的空化现象,高速摄像技术和透明管道是研究空化形貌的一种重要手段。文献[5]给出了典型泵叶片上的超空化气泡照片。文献[6]研究了液体射流泵(liquid jet pump)随阀后压力下降,管道内从空化初生到整个管道内全部空化的过程,并给出了透明管道中的空化图像。文献[7]研究了文丘里管道内的空化阻塞流,认为发生空化阻塞流的管道是由初生、发展和混合与溃散等多个区域构成,并给出了空化图像。上述空化现象可视化研究结果多为空化区域整体图像,而给出直接观测空化气泡的报道相对较少。

此外,流体仿真技术是另一种研究阻塞流流量特性和管道内空化的一种重要手段。文献[8]中提出的全空化模型在计算流体动力学(CFD)软件中得到了广泛应用。文献[9]利用CFD软件和空化建模技术研究了阀门中的流量和空化特性。文献[10]采用3D流体仿真技术研究了先导阀中的空化现象,并提出了优化设计以减小空化的破坏。文献[11]利用OpenFOAM平台对喷口的空化进行了模拟计算。

本文针对阻塞流过程,采用实验与仿真相结合的方法,研究阻塞流生成与发展过程的流量变化规律,建立流量与空化特征之间的关系,为后续调节阀性能优化设计提供物理依据。

1 节流孔板理论流量特性分析

对于管道系统,阻塞流是指在阀前压力固定,阀后压力降低到一定程度后,管道内流量达到极限,此后,即使继续降低阀后压力,管道内流量保持不变。对于不可压缩介质,例如水,阻塞流的出现与水在节流处的相变有关。

阀前后压差较小时,节流孔板流量系数 K_v 值为常数,流量与流量系数满足如下关系:

$$q_v = K_v \sqrt{10\Delta p} \tag{1}$$

式中, q_v 为通过节流孔板的流量; Δp 为压差,MPa。

万方数据

当进入阻塞流状态后,流量达到极限值,即存在极限压差 Δp_T :

$$\Delta p_T = F_1^2 (p_1 - p_{vc}) \tag{2}$$

$$F_1 = \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_{vc}}} \tag{3}$$

$$p_{vc} = P_f p_v \tag{4}$$

$$P_f = 0.96 - 0.28 \sqrt{\frac{p_v}{p_c}} \tag{5}$$

式中, F_1 为压力恢复系数; p_1 为节流孔板前压力; p_2 为节流孔板后压力; P_f 为临界压力比系数; p_v 为饱和蒸汽压; p_c 为液体临界压力^[12]。

当 $\Delta p > \Delta p_T$ 时,流量保持为极限流量:

$$q_{v\lim} = K_v \sqrt{10\Delta p_T} \tag{6}$$

从上面的公式中可以看到,流量曲线分为两条曲线:无空化时, K_v 为常数,流量与 $\sqrt{\Delta p}$ 成线性关系;进入到阻塞流状态后,流量为极限流量。

1.1 不同阀前压力时极限流量的阶梯性

当固定阀前压力时,流量曲线包括 K_v 为常数的线性阶段和达到极限流量后的水平段。进入阻塞流阶段后,流量达到极限流量:

$$q_{v\lim} = K_v F_1 \sqrt{10(p_1 - p_{vc})} \tag{7}$$

可以看出,节流孔板的极限流量与阀前压力和流量系数有关。其中, p_{vc} 近似等于水的在该温度下的饱和蒸汽压 p_v ,因此,对确定的节流孔板构成的节流管道系统而言,阻塞流曲线不仅是一条曲线,而是随阀前压力变化,表现为一簇曲线。

对于节流孔板,流量系数 K_v 和压力恢复系数 F_1 均为常数,极限流量随孔板前压力增大而增大,因此,对于节流孔板构成的管道系统,阻塞流曲线随孔板前压力不同而呈现出一定的阶梯性。由此延伸到阀门部分,节流孔板可以相对地模拟为固定开度的阀门,所以对于阀门,开度不同,流量系数不同,压力恢复系数 F_1 也不相同,表现为一簇斜率不同的斜直线和水平线。

1.2 流量曲线最大压差的极限性

通常的阻塞流曲线在流量和 $\sqrt{\Delta p}$ 平面上表现为一条开放曲线,但是在实际管道系统中,流量曲线却有所限制:系统的最大压差小于 $p_1 - p_{vc}$,也就是阀后压力不能低于 p_{vc} ,如果低于 p_{vc} ,则介质全部变成蒸汽,系统性质将会发生显著变化。因此当介质为水时,系统存在最大压差 $\Delta p_{\lim} = p_1 - p_{vc}$ 。从式(7)中可以发现:极限流量 $q_{v\lim}$ 与最大压差 $\sqrt{\Delta p_{\lim}}$ 成线性关系。

综上所述,在流量和 $\sqrt{10\Delta p}$ 平面内,管道内可能的流量位于阶梯三角形内,如图1所示。大

斜率斜线为无空化流动,斜率为流量系数 K_v 。小斜率斜线为最大压差 Δp_{lim} 时的极限流量,斜率为 $K_v F_1$ 。图中水平线为既定阀前压力下的极限流量 q_{vlim} 。理论上讲,斜线不通过原点主要是因为:当流动为层流时,流量系数 K_v 要小于雷诺数较大时的流量系数。

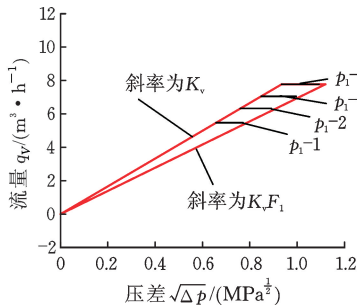


图 1 节流孔板理论流量特性图

Fig.1 Flow characteristics analysis of throttling orifice plate

实际管道系统中,流量曲线从常系数的 K_v 流动到极限流量的发展过程为非线性过程。

2 阻塞流发展过程实验研究

阻塞流过程与节流孔板结构、流通介质和实验工况都有关系,因此采用实验方式研究阻塞流不同发展阶段的流量特征。基于设计的实验台架,首先以孔板作为节流部件,研究管道流量变化规律;然后,采用透明管段,结合高速摄像技术和微距拍摄技术,以可视化方式直接观察阻塞流发展过程的空化特征。

2.1 实验台架

2.1.1 台架设计

实验台架装置是一套封闭的循环系统,主要由主管路、旁路、回路组成;液态水为实验介质;离心泵提供系统动力。设计的实验台架结构见图 2。

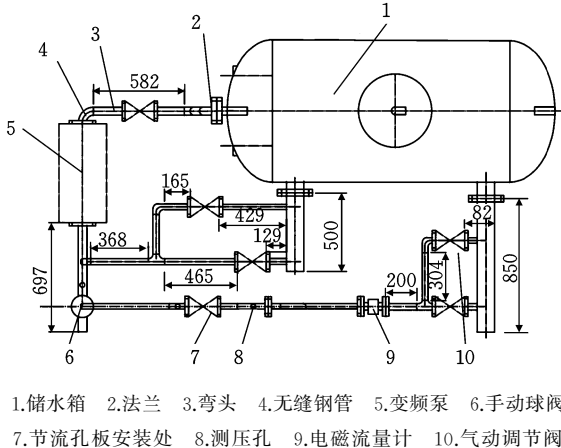


图 2 实验台架

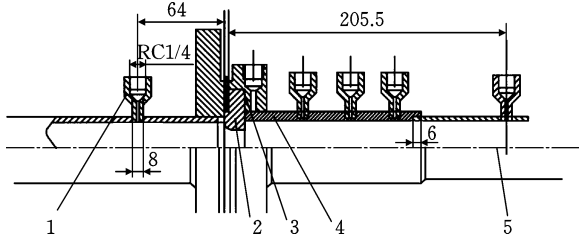
Fig.2 Experimental equipment

2.1.2 管段和透明管段设计

孔板采用法兰连接安装在实验段处,如图 3 所示。为了观测实验过程中的空化现象,设计透明管段如图 3b 所示。

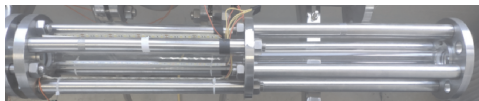
2.1.3 工况建立

实验工况的建立分为以下步骤:①调节变频泵至固定初始压力;②改变图 2 所示部件 10 气动调节阀的开度,改变孔板后压力;③调节变频泵的输出,使其压力固定在步骤①所设定的值。



1.取压接头 2.孔板组件 3.O 形圈
4.阀板法兰组件 5.无缝钢管

(a) 采样管段设计图



(b) 透明管段

图 3 实验段结构设计图

Fig.3 Structure drawing of experimental section

2.2 节流孔板设计

设计节流孔板旨在从一定程度上模拟阀门、管道节流件等节流装置,对于管路系统,其本质皆是一定的流阻元件。本文节流孔板设计尺寸如下:厚孔板厚度 $L=16\text{ mm}$,孔径 $\phi 8\text{ mm}$ 、 $\phi 16\text{ mm}$,入口处圆弧过渡,后文标记为 $\phi 8 \times 16$ 和 $\phi 16 \times 16$ 。管道系统流通方向由倒角处流入,如图 4 所示,从左至右。

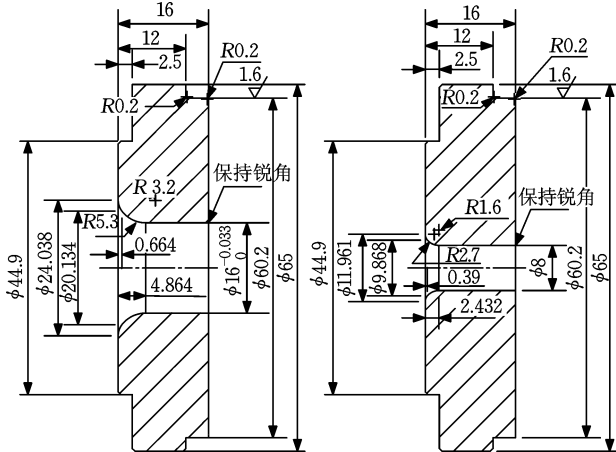


图 4 实验孔板结构设计图

Fig.4 Drawing of orifice plate

2.3 孔板流量特性分析

为了研究温度节流孔板的流通能力的影响，选择 $\phi 8 \times 16$ 孔板作为节流件，孔板前压力为 900 kPa，测量不同孔板后压力下的流量，如图 5 所示。可以发现在研究的范围内，流量并未有显著变化。图中也给出了名义的 K_v ，可以看出在临界压力之前， K_v 基本上保持水平；靠近临界压力处， K_v 有变小的趋势，但是基本上不太明显。因此可以认为，受限于台架与测试器件的测量范围，在研究温度区间内，流量特性并未有显著变化。

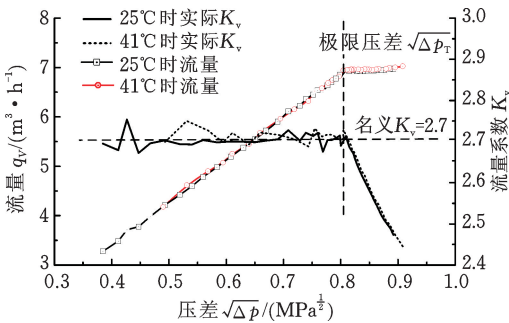


图 5 不同温度下的流量曲线

Fig.5 Flow curves at different temperatures

- 从上面的流量实验中可以发现：
- (1) 节流孔板的可能流量(图 6)局限于三角形内，大斜率直线代表无空化流动，水平线为不同孔板前压力下的极限流量，小斜率直线为孔板的极限流量。
 - (2) 对于图 6 所示流量曲线，流量可以作为阻塞流判断依据，但无法作为空化出现的判据。
 - (3) 温度在小范围变化时(15 ℃)，节流孔板的流量特性并未有显著变化。

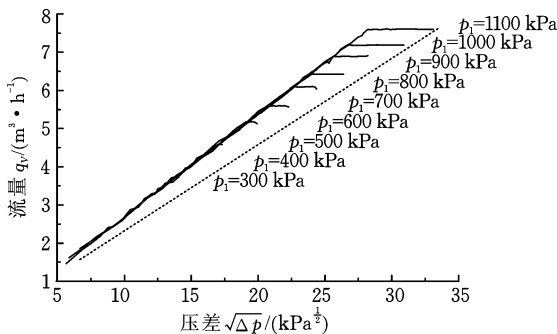


图 6 $\phi 16$ 孔板流量曲线

Fig.6 $\phi 16$ -orifice plate flow curve

2.4 阻塞流空化特征可视化研究

阻塞流产生的原因是由于管道内压力低于饱和蒸汽压，水发生相变转化为气体，形成了液气两

相流，导致流量达到极限流量后不再增大。为了观测阻塞流发展过程中的空化现象，采用透明管段方式，结合摄影成像技术，研究阻塞流形成过程

的空化规律。进而，为了获取空化气泡的确切证据，采用微距成像方式拍摄成形气泡形貌，为空化现象提供直接证据。

图 7 为阻塞流初始、发展和完全阻塞过程的图像。保持孔板前压力为 900 kPa，减小孔板后压力，观测透明管道内的流动情况。首先为无空化流动(图 7a)，然后随孔板后压力的减小，孔板后开始出现空化气泡，在距离节流较近的区域空化气相比例较高，远处相对较小(图 7b)。孔板后压力继续下降，管道内完全空化(图 7c)。

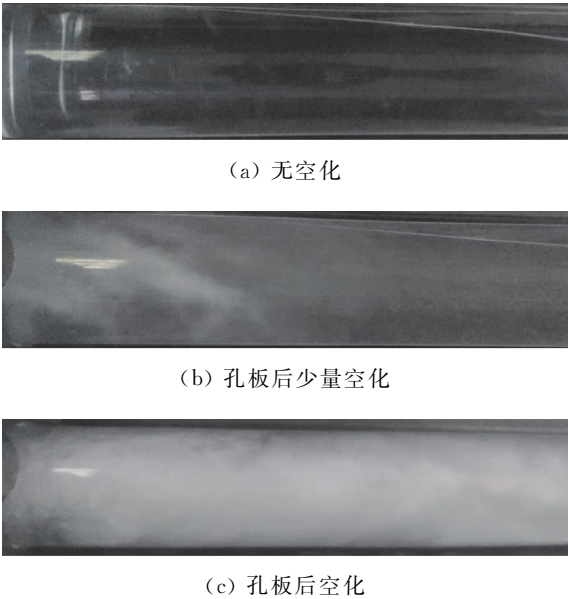


图 7 阻塞流发生发展过程

Fig.7 Development process of blocking flow

为了进一步证实图 7 中白色区域为空化区域，采用微距拍摄技术对完全空化区域进行进一步观测。图 8 为微距拍摄图像，从图中可以明确观测到管道内的空化气泡，空化气泡尺度大小不一，从 0.1 mm 到 1 mm，小气泡圆度相对较好，大气泡形状很多以椭圆的形状出现，这可能与气泡膨胀过程中外部作用有关，即小气泡受力较为均衡，大气泡受力不均。

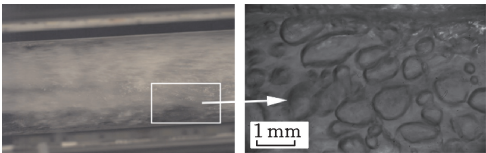


图 8 空化气泡图像

Fig.8 The image of cavitation bubble

3 基于 CFD 的阻塞流发展过程中空化特征仿真

为了进一步研究阻塞流发展过程,采用 CFD 仿真技术研究阻塞流过程中的流量与空化现象的关系。首先通过与实验数据的对比分析来验证分析技术的有效性,然后基于仿真技术研究典型阻塞流发展过程的流量与空化演变规律。

3.1 仿真技术有效性分析

建模时,选用的多相流模型为混合模型 (mixture model),液体水 (water-liquid) 为主相,水蒸气 (water-vapor) 为次相。湍流模型为 Realizable $k-\epsilon$ 模型,近壁区域采用 Standard wall function。空化模型选用 Schnerr-Sauer 模型。求解算法选用 coupled 算法。边界条件为孔板前和孔板后压力。

3.1.1 流量计算

仿真时,边界条件为孔板前后压力,计算流量如图 9 所示,可见仿真分析所得流量数据与实验所采集流量数据吻合较好,验证了仿真模型的有效性。

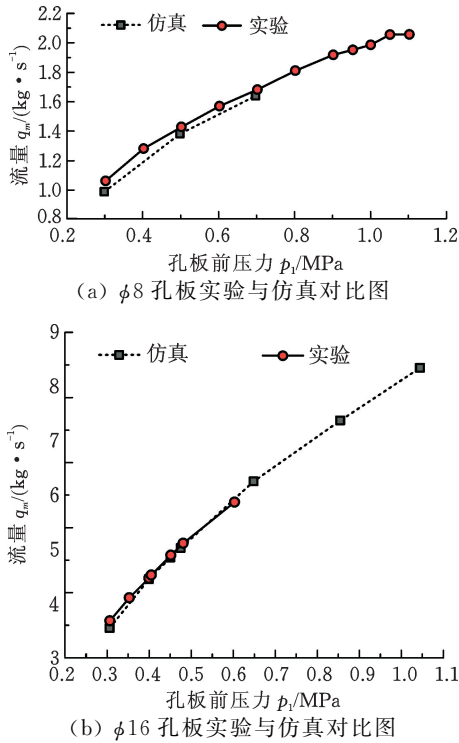


图 9 $\phi 8$ 和 $\phi 16$ 实验与仿真流量数据对比图
Fig.9 Comparison diagram between the experiment and simulation flow

3.1.2 压力计算与空化程度分析

图 10 为实验与仿真压力大小分布图,图中横坐标为至孔板前压力 p_1 采样口的距离。由图 10 可以看出:实验压力采样点的压力与仿真计算压

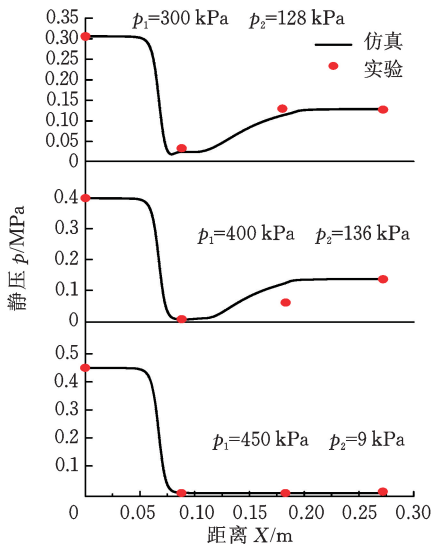


Fig.10 Comparison diagram between the experiment and simulation pressure

力曲线吻合较好,证明了仿真的有效性。

3.2 孔板阻塞流发展过程分析

$\phi 8 \times 16$ 和 $\phi 16 \times 16$ 的流量特性基本为双线性特性,空化过程包括节流孔板后局部空化到整体空化的过程。为了研究阻塞流发展过程的空化规律,采用 CFD 技术研究不同压力下的空化特征。

图 11 给出了 $\phi 8$ 孔板前压力为 400 kPa,不同孔板后压力下的空化特征。可以看出:在阻塞流发展过程中,空化主要包括节流孔板内空化和节流孔板后空化两个阶段。第一阶段,随孔板后压力下降,孔板内流速增加、压力下降,当孔板内压力小于水的饱和蒸汽压后,孔板内出现空化。第二阶段是当孔板后压力继续下降,孔板后出现空化现象。

图 12 给出了阻塞流发展过程中随孔板后压力下降,流量、整个仿真区域内的气体的体积和管道内空化的变化过程。①孔板节流处空化阶段,孔板内空化程度逐渐加强,这时的气相体积相对较小,然后,空化区域逐渐拓展至整个孔板,当孔板内出现完整空化时,管道流量迅速达到极限流量。在这个过程中, K_v 值为非线性变化,但是非线性变化程度较低。此时,即可认为是阻塞流的充分发展阶段。②管道内空化的发展阶段,孔板后管道内空化是一个快速发展的过程,气相体积快速增大,流量基本保持不变。

在第一阶段的孔板内空化过程中,随孔板后压力下降,孔板后未出现显著空化。从流量角度分析,节流孔处完全空化就意味着系统进入阻塞流阶段;从整个管道空化程度分析,孔板后出现大

量空化气泡,也就是管道的阻塞流的空化最剧烈的阶段。因此,对于厚节流孔板,在未达到临界压差时,孔板内已经出现空化,也就意味着此时孔板存在一定的空化气蚀的潜在风险。

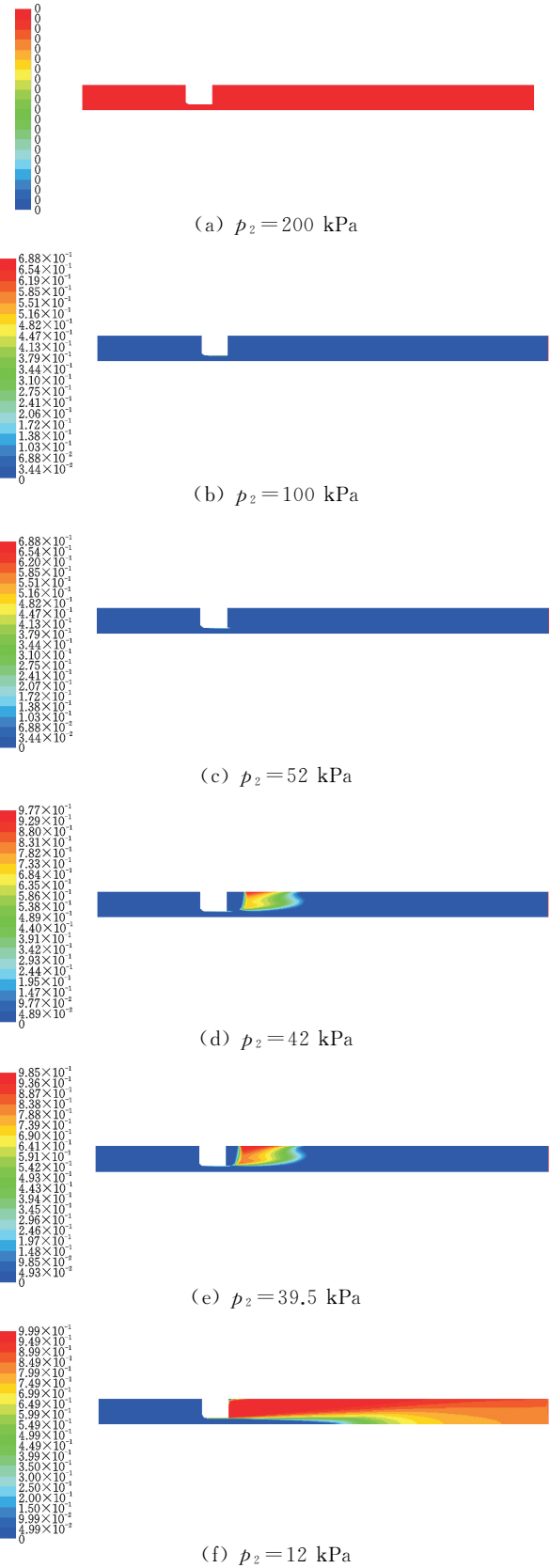


图 11 $p_1=400$ kPa 空化发展过程

Fig.11 Cavitation development process($p_1=400$ kPa) 万方数据

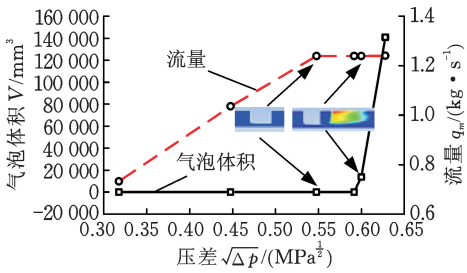


图 12 $\phi 8$ 孔板仿真气体体积变化

Fig.12 Simulation gas volume change of $\phi 8$ -orifice plate

4 节流孔板阻塞流特性

4.1 阻塞流的斜梯形曲线特征

流量曲线是描述阻塞流发展过程的重要工具,综合考虑阻塞流曲线的阶梯性、流量的极限性等特性,本文将流量曲线(图 13)命名为斜梯三角形流量曲线,它描述了节流孔板与阻塞流发生发展过程的全景。

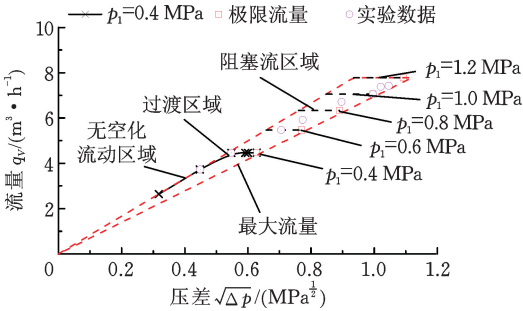


图 13 $\phi 8$ 孔板斜梯三角形流量曲线

Fig.13 $\phi 8$ -orifice plate ramp triangle flow curve

斜梯三角形流量曲线是由一系列固定孔板前压力的阻塞流曲线和最大压差下的流量曲线构成的封闭区间。①流量局限性:可能的流量局限在斜梯形内。②流量曲线的阶梯性:不同孔板前压力下的流量曲线组成了一个阶梯。③流量曲线的局部特征:每条阻塞流曲线包括无空化流动区域、阻塞流区域。④无空化流动区域 K_v 为常数,流量呈线性变化;阻塞流区域为该孔板前压力下的最大流量。

4.2 阻塞流发展过程特征

阻塞流发展过程的空化由节流孔板内空化和节流件后空化两个部分构成。通过可视化技术观测到的阻塞流发展过程图像和微距拍摄的空化气泡图像,再次证实了阻塞流发生的内在机理在于介质空化导致的液气两相流。

对于 $\phi 8 \times 16$ 孔板,节流孔尺寸决定了极限流量(图 13)。在孔板内初始空化时, K_v 变化不大,当孔板内空化完全后,流量达到极限流量,这时阻塞流已经充分发展。随孔板后压力进一步下

降,孔板后出现空化,但是流量不再增加。

5 结论

大压差工作环境下,由于液气两相流(空化)现象引起的阻塞流对系统流通性能具有重要的影响,因此采用理论、实验和仿真等方法,以节流孔板为对象,研究管道内介质为水时的阻塞流的非线性发展过程,得到结论主要如下:

(1)提出采用阻塞流斜梯三角形流量曲线来描述节流孔板的阻塞流特性,以充分表达流量的局限性特征、阶梯性特征。

(2)通过阻塞流发展过程图像和微距拍摄空化气泡图像,再次证实了阻塞流发生的内在机理在于介质空化导致的液气两相流。孔板空化过程包括孔板内空化和孔板后空化两个阶段。

(3)厚孔板的节流情况下,单纯的流量可以作为阻塞流出现的判据,但不能作为空化发生的判据。

参考文献:

- [1] WINKLHOFFER E, KULL E, KELZ E, et al. Comprehensive Hydraulic and Flow Field Documentation in Model Throttle Experiments under Cavitation Conditions[C]//17th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. New York, 2001: 67-90.
- [2] SANDEEP M, DHIMAN C, SHAMIT B, et al. Numerical Prediction of Potential Cavitation Erosion in Fuel Injectors[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2018, 104:1-12.
- [3] ABDULAZIZ A. Performance and Image Analysis of a Cavitating Process in a Small Type Venturi[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014,53: 40-48.
- [4] ZHANG X, WANG D, LIAO R, et al. Study of Mechanical Choked Venturi Nozzles Used for Liquid Flow Controlling [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2019, 65: 158-165.
- [5] AGOSTINOL D, SALVETTI M V. Fluid Dynamics of Cavitation and Cavitating Turbopumps[M]. New York: Springer Vienna, 2007: 146-152.

- [6] LONG X, YAO H, ZHAO J. Investigation on Mechanism of Critical Cavitating Flow in Liquid Jet Pumps under Operating Limits [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52: 2415-2420.
- [7] WANG J, WANG L, XU S, et al. Experimental Investigation on the Cavitation Performance in a Venturi Reactor with Special Emphasis on the Choking Flow[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019,106: 215-225.
- [8] SINGHAL A, MAHESH M, LI H, et al. Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model[J].Journal of Fluids Engineering: Transactions of the ASME, 2002,124(3): 617-624.
- [9] LIANG J, LUO X, LIU Y, et al. A Numerical Investigation in Effects of Inlet Pressure Fluctuations on the Flow and Cavitation Characteristics Inside Water Hydraulic Poppet Valves [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 103: 684-700.
- [10] YANG Q, AUNG N Z, LI S. Confirmation on the Effectiveness of Rectangle-shaped Flapper in Reducing Cavitation in Flapper-nozzle Pilot Valve[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 98: 184-198.
- [11] 高永强,魏明锐,谭保华,等.基于 OpenFOAM 的喷孔内部流动与近场雾化的数值模拟[J].中国机械工程,2016,27(1):79-84.
GAO Yongqiang, WEI Mingrui, TAN Baohua, et al. Numerical Simulation of Internal Flow of Nozzles and Near-field Sprary with OpenFOAM[J]. China Mechanical Engineering, 2016,27(1):79-84.
- [12] IEC 60534-2-1. Industrial Process Control Valves Part2-1: Flowcapacity-Sizing Equations for Fluid Flow under Installed Conditions[S]. New York:IX-IEC, 1999.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:俞柯鑫,男,1995年生,硕士研究生。研究方向为故障诊断、智能控制。Kxuyu1995@qq.com。尚群立(通信作者),男,1964年生,教授。研究方向为调节阀所在系统的理论与应用。发表论文 10 余篇。E-mail:qlshang@zjut.edu.cn。