

DOI: 10.7652/xjtuxb201802018

水液压微型阻尼孔的流量特性和气蚀特性

杨友胜, 陈宇琪, 秦彬

(中国海洋大学工程学院, 266100, 山东青岛)

摘要: 针对水的汽化压力高、黏度低等特殊理化特性,油液压阻尼孔设计理论应用于水液压元件设计会产生较大误差且现有水液压元件实验存在阻尼孔直径过大、压力过低等问题,设计了水液压微型阻尼孔元件(孔径 $d \leq 1$ mm),并对其流量特性、气蚀特性等水力学特性进行仿真和实验研究。实验结果验证了仿真模型的正确性,平均流量误差为 5.22%,流量系数误差小于 15%;仿真研究了气穴现象产生的规律,无论有无背压,阻尼孔气穴现象首先在进口部位产生,并随着两端压差的增大向出口推移;仿真和实验研究了特征尺寸及背压对微型阻尼孔流量特性和气蚀特性的影响,阻尼孔的流量与孔径及长径比呈非线性关系,有背压时,阻尼孔的流量大于无背压时的流量,流量系数亦高于无背压时的流量系数,且流量饱和现象比无背压时明显。大孔径的阻尼孔相对于小孔径的阻尼孔更易发生气穴现象,相同孔径下,长径比 $l/d=7$ 的阻尼孔抗气蚀效果最优。提高背压有利于抑制气穴现象发生。在设计微型阻尼孔时,可选取小孔径、长径比 $l/d=7$ 的阻尼孔,增加背压可以减少气穴现象对阻尼孔的侵蚀和破坏。

关键词: 水液压;微型阻尼孔;流量特性;气蚀

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)02-0118-07

Flow and Cavitation Characteristics of Micro Damping Orifices in Water Hydraulics

YANG Yousheng, CHEN Yuqi, QIN Bin

(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: Due to the special physical and chemical properties of the low viscosity and high saturated vapor pressure of water, the design theory of oil hydraulic damping orifice for water one will produce greater deviation and the existing water hydraulic components experiment has the problems of damping orifice diameter being too large, the water pressure being too low and so on. Numerical simulation and experimental studies have been carried out to investigate the flow and cavitation characteristics of water hydraulic damping orifices with diameter ≤ 1 mm. The experimental results verify the correctness of the simulation model, the average flow error is 5.22%, and the flow coefficient error is less than 15%. The discipline of cavitation phenomenon has been studied by numerical simulation, and it is found that the cavitation first occurs at the inlet of orifices and then shifts to the outlet gradually with the increase of the pressure difference. The effects of characteristic size and backpressure on the flow characteristics and cavitation

收稿日期: 2017-06-14。 作者简介: 杨友胜(1976—),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275495, 51475197, 51708528);山东省重点研究发展计划资助项目(2017GGX30106);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(201562009)。

网络出版时间: 2017-11-28

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20171128.1540.010.html>

characteristics of micro-damping orifices have been studied by numerical simulation and experiments, and it is found that the flow rate of the damping orifice is nonlinear with the diameter and the length to diameter ratio. The flow coefficient and the flow rate through the damping orifice with backpressure are greater than those without the backpressure, and the flow saturation phenomenon is more pronounced than that without backpressure; cavitation is more prone to happen in the damping orifice with a larger diameter, and the damping orifice with length to diameter ratio $l/d=7$ has the best anti-cavitation ability. Obviously, increasing the backpressure can improve the anti-cavitation ability. In the design of micro-damping orifice, a small diameter and aspect ratio $l/d=7$ damping orifice can be selected. Increasing the backpressure can reduce the erosion and damage to the damping hole by cavitation.

Keywords: water hydraulics; micro damping orifice; flow characteristic; cavitation

在液压元件中,阻尼孔起着重要的作用。利用阻尼孔的阻尼特性制成的阻尼器,具有节流、调压、缓冲及减振等作用^[1-3]。例如,在先导式溢流阀中,利用阻尼孔在主阀芯两端形成压差的特点,主阀芯在压差的作用下开启,实现溢流稳压;在定值减压阀中,主要利用阻尼孔来降低液压系统某一支油路的压力,使分支压力比主油路压力低且稳定,起着减压与稳压作用。

因为水具有黏度低、饱和蒸气压高等特殊理化特性^[4-7],水液压阻尼孔特性不同于以液压油为工作介质的阻尼孔特性,所以油液压阻尼孔设计经验不完全适用于水液压^[8]。国内外学者对水液压阻尼孔的特性进行了一系列的研究,例如华中科技大学的朱碧海等,对长径比 $l/d=1\sim15$ 、孔径 $d=0.8\sim3.0$ mm 的阻尼孔的流量特性进行了实验研究,其最大工作压力为 3.2 MPa,得到气蚀发生时的流量系数小于无气蚀发生时的流量系数^[9];Liu 等采用可视化方法,对长径比 $l/d=1\sim15$ 、孔径 $d=0.8\sim3.0$ mm 的阻尼孔特性进行了研究,其最大工作压力为 12 MPa,得到小长径比、大孔径阻尼孔更容易发生气蚀,就其所实验的阻尼孔而言,孔径 $d=0.8$ mm 的阻尼孔抗气蚀性能最佳^[10];Dabiri 等以长径比 $l/d=1\sim5$ 的阻尼孔为研究对象,观察了其在雷诺数 $Re=100\sim2\,000$ 下的气穴现象,对比分析了预测气蚀发生时的压力标准和总应力标准,发现在雷诺数较低时,2 个标准之间的相对误差较大,随着雷诺数的增加,其相对误差随之减小,在高雷诺数、小长径比下观察到了水力柱塞流,此时气蚀区域消失^[11];Yamaguchi 等研究了流体介质特性和阻尼孔材料对阻尼孔气穴特性的影响,但对阻尼孔内部流场并没有进行深入的理论和实验研究^[12]。

现有的研究对象阻尼孔特征尺寸较大,工作压

力较低,而特征尺寸对阻尼孔特性的影响很大,并且在水液压元件中,通常采用微型阻尼孔($d\leq1$ mm),所以有必要研究孔径 $d\leq1$ mm 的阻尼孔特性,完善水液压阻尼孔设计理论。

为了完善水液压阻尼孔设计理论,本文以孔径 $d\leq1$ mm、长径比 $l/d=2\sim10$ 的阻尼孔为研究对象,建立了计算模型及实验平台,研究了其特征参数及背压对流量特性和气蚀特性的影响,并对结果进行了对比分析。实验结果表明:①仿真与实验趋势一致,误差较小;②相同压差下,阻尼孔的流量与孔径及长径比呈非线性关系;③有背压时,阻尼孔的流量和流量系数均大于无背压时;且有背压时,存在流量饱和现象,而无背压时,流量饱和现象不明显;④相同长径比下,大孔径的阻尼孔更易发生气蚀;相同孔径下,长径比 $l/d=7$ 的阻尼孔抗气蚀效果最优;⑤背压对阻尼孔气蚀特性存在较大的影响。

1 模 型

1.1 物理模型

阻尼孔结构如图 1 所示,对孔径 $d=0.3\sim1.0$ mm、长径比 $l/d=2\sim10$ 的阻尼孔进行了实验,具体尺寸见表 1。

表 1 不同长径比和孔径下的阻尼孔长度

$l\cdot d^{-1}$	阻尼孔长度 l/mm					
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6
2	0.6		1.0		1.6	2.18
3	0.9		1.5		2.18	
4	1.2		2.18	2.18	3.2	
5	1.5	2.18	2.54		4.0	
7	2.18		3.5		5.6	
10	3.0		5.0		8.0	

注: $d_1=0.3$ mm; $d_2=0.4$ mm; $d_3=0.5$ mm; $d_4=0.6$ mm; $d_5=0.8$ mm; $d_6=1.0$ mm。

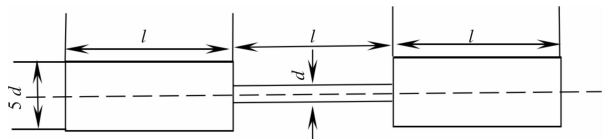


图1 阻尼孔的几何形状

1.2 网格模型

鉴于阻尼孔的轴对称结构,本文将其简化为二维轴对称模型,阻尼孔的网格划分如图2所示, OO' 为对称轴, AO 为压力进口, FO' 为压力出口,其余为壁面。假设水是不可压缩黏性流体,壁面不传热且没有滑移,水的密度 $\rho=998.2 \text{ kg/m}^3$,水的黏度 $\mu=1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,忽略温度和压力对水的密度、黏度的影响。在仿真过程中,水的汽化压力高、流速大、水力学直径小、雷诺数大,因此引入 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型(能量方程 k 和耗散方程 ϵ)和多相模型,并利用 Mixture 模型中的 Cavitation 模块模拟阻尼孔的气穴现象,近壁面区域采用 Enhanced wall treatment 壁面函数。仿真过程中,其温度控制在 27°C ,并分为无背压和有背压2组,其过程如下:①无背压时,设定出口压力 p_2 为 0.2 MPa ,进口压力 p_1 从 0.2 MPa 开始,以 0.5 MPa 为步差递增至 10.2 MPa ,最大压差为 10 MPa ;②有背压时,设定进口压力 p_1 为 8 MPa ,出口压力 p_2 从 7.7 MPa 开始,以 0.5 MPa 为步差递减至大气压力。



图2 阻尼孔的网格划分

1.3 实验模型

图3给出了阻尼孔水力学特性实验原理图,实验台主要由电机、水液压泵、溢流阀、节流阀、截止阀、压力表、压力传感器、阻尼孔及量筒等组成。

实验时,由水液压泵泵出水,从阻尼孔左侧流入,右侧流出;通过调节电机的转速来控制通过阻尼孔的流量及进口压力,阻尼孔出口压力由回水路上的节流阀控制;流量由回水路上的量筒和秒表测得,阻尼孔的进出口压力由压力传感器测得;当节流阀全开时,出口压力为大气压力。

在实验过程中,温度维持在 $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$,对每组阻尼孔采集无背压和有背压2组数据。流量系数与雷诺数的关系曲线常用来表征阻尼孔的流动特性,流量系数的表达式为

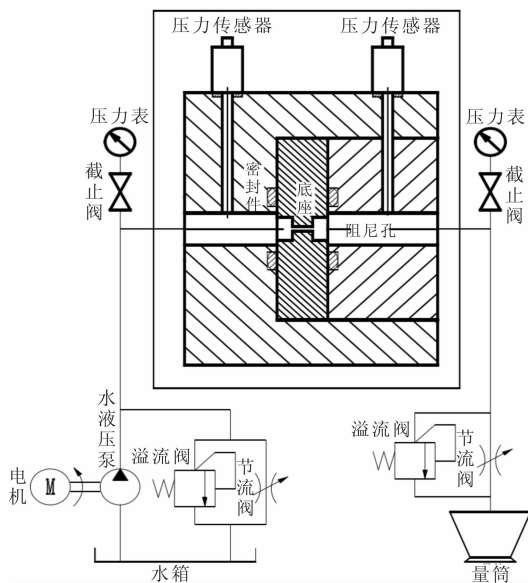


图3 阻尼孔流量压力特性实验台原理图

$$C_q = q/[A_d(2\Delta p/\rho)^{1/2}] \quad (1)$$

式中: $A_d=\pi d^2/4$;压差 $\Delta p=p_1-p_2$ 。

雷诺数的表达式为

$$Re = ud/v = 4q/(\pi dv) \quad (2)$$

式中: u 为水的流速; v 为水的运动黏度; q 为通过阻尼孔的流量。

当水介质通过阻尼孔时,由于流速急剧升高,使该处压力降低而达到蒸汽压,导致产生大量的蒸汽气泡,形成强烈的气穴现象。当气泡随着水流被带到高压区时,气泡体积急剧缩小或溃灭,并又重新凝结成液体。这种现象会导致瞬间局部压力和温度急剧上升,从而导致液压元件表面剥蚀,称为气蚀现象。气穴模型属于多相流模型之一,两相分别为气相和液相。气相和液相的体积比关系如下

$$\alpha_l + \alpha_g = 1 \quad (3)$$

式中: α_l 为液相体积比; α_g 为气相体积比。

2 结果讨论

2.1 仿真与实验对比分析

图4和图5是 $d=0.3, 0.5 \text{ mm}$ 的阻尼孔的流量特性仿真与实验结果。由图4可以看出,仿真和实验结果的趋势一致,在相同压力条件下,其流量平均相对误差为 5.22% ,误差在允许范围之内;由图5可以看出,在相同雷诺数条件下,其流量系数相对误差小于 15% ,因此实验现象可以用仿真结果来描述。

2.2 阻尼孔参数对气蚀特性的影响

采用前面的网格模型,本文对 $d=0.3, 0.5, 0.8$

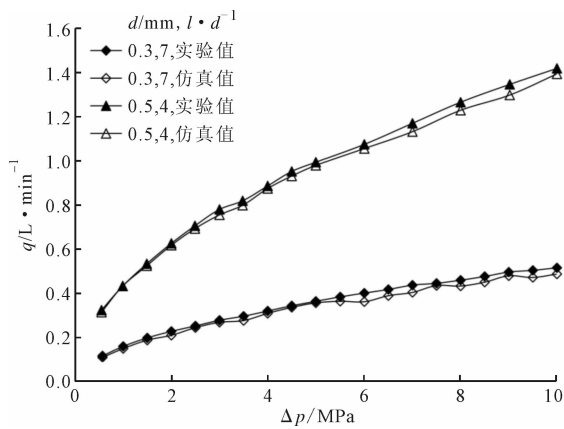


图 4 不同尺寸阻尼孔时流量与压差的关系

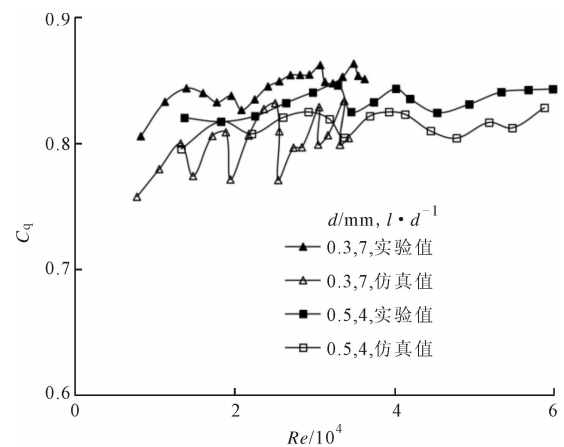


图 5 不同尺寸阻尼孔时 C_q 与 Re 的关系

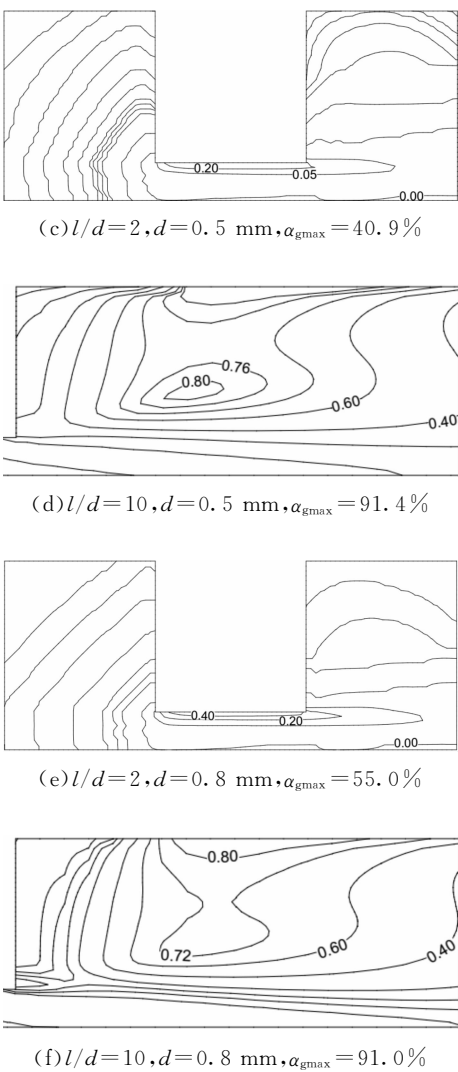


图 6 气相体积比等值线图

mm, $l/d=2, 3, 4, 5, 7, 10$ 的阻尼孔进行了仿真模拟。图 6 给出了无背压时阻尼孔的气相体积比等值线图,此时阻尼孔两端的压差为 10 MPa,气相体积比越大,说明水中的含气量越多,气穴现象越严重。

图 7 给出了各型号阻尼孔对应的最大气相体积比,当 $l/d=2\sim7$ 时,随着阻尼孔孔径的增大,最大气相体积比增大,气穴现象也越来越严重;当 $l/d=$

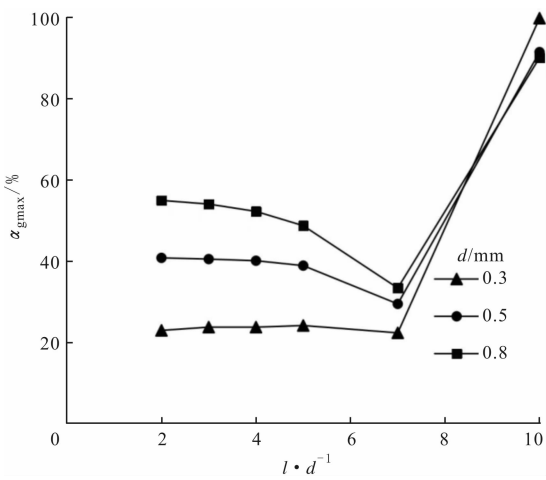
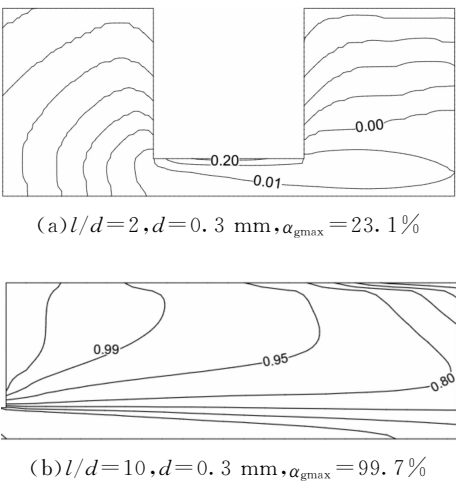


图 7 长径比对最大气相体积比的影响

10 时,3 组阻尼孔的最大气相体积比均已超过 91%,说明此时的气穴现象十分严重,很容易发生气蚀。在长径比相同的情况下,孔径大的阻尼孔相对



于孔径小的阻尼孔更容易发生气蚀。

相同孔径下,当 $l/d=2\sim 5$ 时,最大气相体积比变化不大;当 $l/d=7$ 时,3 组阻尼孔的最大气相体积比达到最小值,表明 $l/d=7$ 时,气蚀对阻尼孔的影响最小。相同孔径下, $l/d=7$ 的阻尼孔抗气蚀效果最优。

2.3 背压对气蚀特性的影响

以 $d=0.4\text{ mm}$ 、 $l/d=5$ 的阻尼孔为例,分析无背压和有背压的情况下,阻尼孔气穴现象随背压的变化情况,如图 8 所示。

由图 8a 可以看出,阻尼孔进口部位有较为微弱的气穴现象,最大气相体积比为 15.06%;由图 8b 可以看出,阻尼孔进口部位出现收缩,收缩断面处的气相体积比明显比其他地方大,表明该处气穴现象严重,即在进口压力更低时,阻尼孔已出现收缩断面和气蚀;由图 8c 可以看出,随着阻尼孔两端压差的增大,水流中的含气量增大,气穴现象加剧,而且向出口转移;由图 8d 可以看出,此时水流中的含气量进一步增大,并且出口的水流中的气相体积比也增大,表明气穴已扩展到阻尼孔出口。

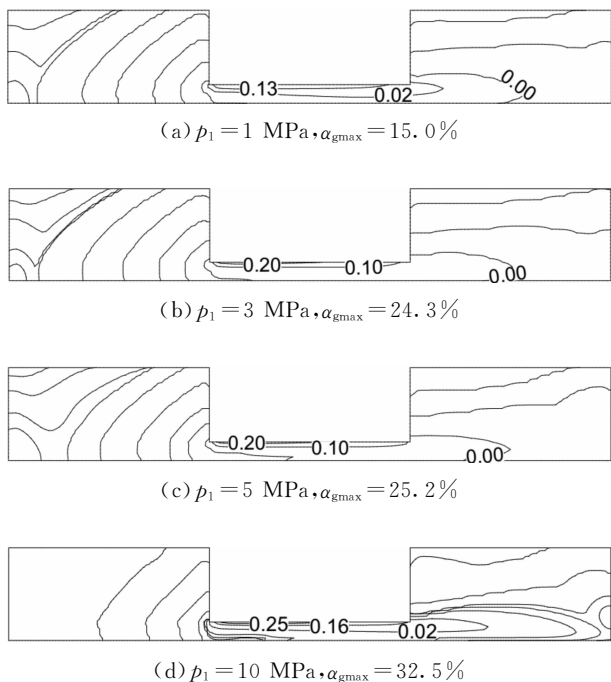


图 8 无背压时不同进口压力下的气相体积比等值线图

有背压时,当阻尼孔两端压差 $\Delta p=6\text{ MPa}$ 时,阻尼孔进口开始出现微弱的气穴现象。 Δp 较小时,阻尼孔并无气穴现象产生,直到 $\Delta p \geq 6\text{ MPa}$,开始有气穴现象产生。

综上所述,背压对阻尼孔的气蚀特性有显著的影响。在无背压的情况下,气穴现象在阻尼孔两端

压差很小时就产生了;在有背压的情况下,气穴现象产生时的压差则要比无背压时高得多。可见,提高背压是抑制气穴现象发生的重要手段。

2.4 阻尼孔特征参数对流量特性的影响

图 9 给出了无背压时 $l=2.18\text{ mm}$ 的阻尼孔在不同长径比时的流量压差曲线。由图 9 可以看出,相同压差下,随着阻尼孔长径比的增大,阻尼孔的流量逐渐减小。相同阻尼孔长度下,长径比越小,阻尼孔的流量越大。

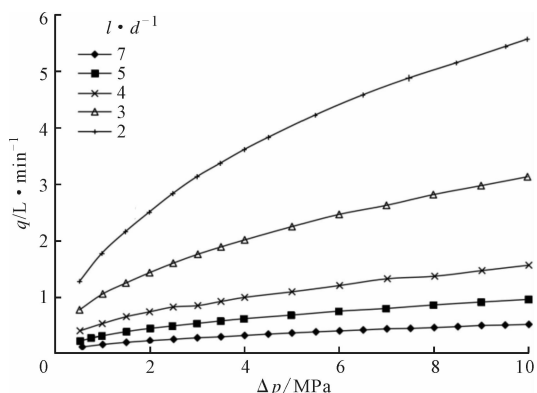


图 9 不同长径比时流量与压差的关系 ($l=2.18\text{ mm}$)

无背压时阻尼孔流量系数与雷诺数的关系如图 10 所示。由图 10 可以看出,长径比为 4 的阻尼孔在无背压时的流量系数为 0.66 左右,明显小于其他阻尼孔的值,其他阻尼孔的流量系数在 0.7 以上。

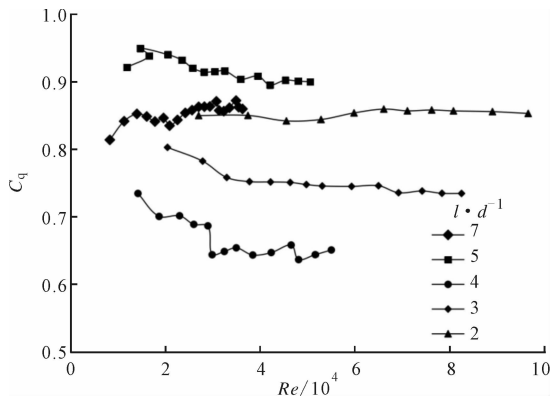


图 10 不同长径比时 C_d 与 Re 的关系 ($l=2.18\text{ mm}$)

图 11 给出了无背压时长径比为 5 的阻尼孔在不同长度时的流量压差曲线。由图 11 可以看出,相同压差下,随着阻尼孔长度的增大,阻尼孔的流量逐渐增大。在相同长径比的情况下,阻尼孔越长,阻尼孔的流量也就越大。无背压时,其阻尼孔的流量系数与雷诺数的关系如图 12 所示。由图 12 可以看出,长度为 4 mm 的阻尼孔在无背压时的流量系数为 0.75 左右,小于其他阻尼孔的值,其他阻尼孔的流量系数在 0.85~0.91 之间。

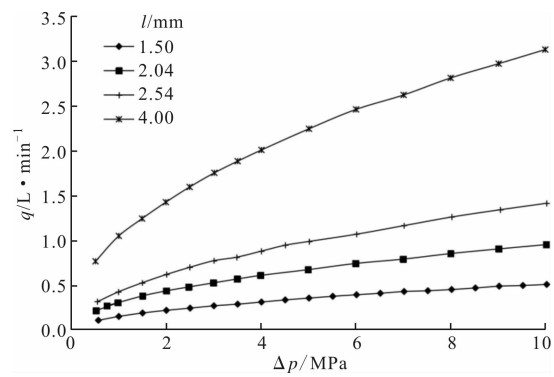


图 11 不同阻尼孔长度时流量与压差的关系($l/d=5$)

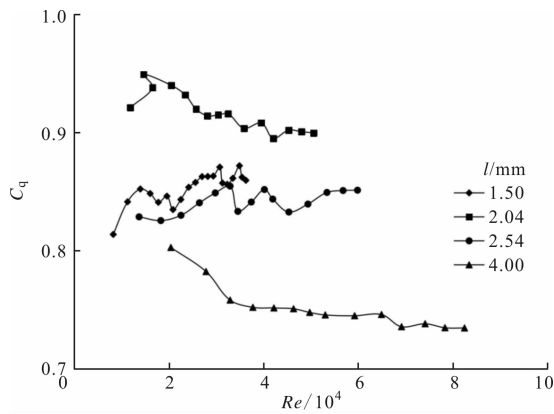


图 12 不同阻尼孔长度时 C_q 与 Re 的关系($l/d=5$)

2.5 背压对流量特性的影响

图 13 给出了长度为 2.18 mm 的阻尼孔在不同长径比时的流量压差曲线。由图 13 可以看出,无背压时,阻尼孔的流量均随着其两端的压差增大而增加,流量饱和现象不明显;有背压时,在流量达到饱和之前,阻尼孔的流量均随着其两端的压差增大而增加;当两端压差达到某一值后,有背压时开始出现流量饱和现象,流量不再随压差的增大而增加;在阻尼孔两端压差相同的情况下,有背压时的流量大于无背压时的流量;对于相同长度、不同长径比的阻尼

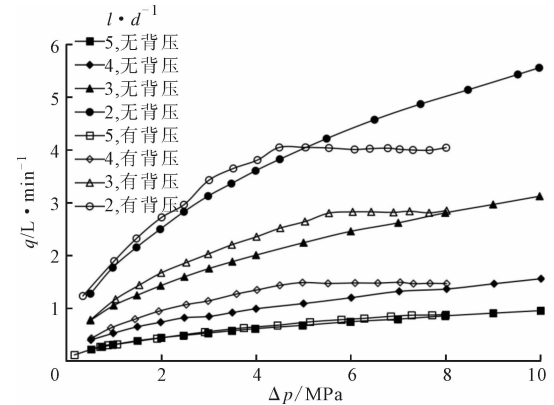


图 13 有无背压时流量与压差的关系($l=2.18\text{ mm}$)

孔,出现流量饱和时的压差也不一样。

图 14 给出了长度为 2.18 mm 的阻尼孔在不同长径比时的流量系数曲线。由图 14 可以看出,有背压时的流量系数在 0.84~0.95 之间,无背压时的流量系数在 0.85~0.91 之间,有背压时的流量系数高于无背压时的流量系数;有背压时,流量系数曲线均出现拐点,而此时的压差是气穴现象初生时的压差。由此可见,出现气穴现象时,有背压时的压差大于无背压时的压差;由于气穴现象的产生,以致部分水流能量被气蚀消耗,从而导致无背压时的流量系数小于有背压时的流量系数;当压差增加到一定程度时,有背压时的气穴现象愈加严重,消耗了更多的水流能量,从而流量系数曲线出现拐点,开始变小。

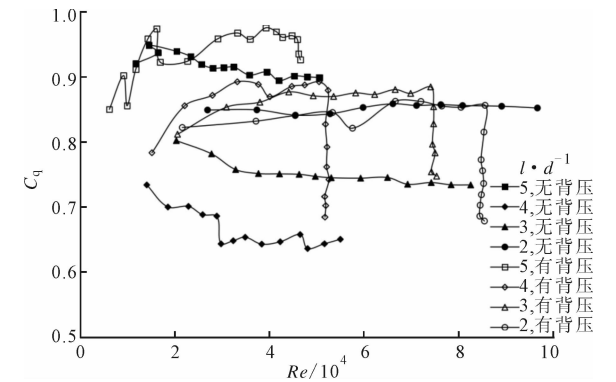


图 14 有无背压时 C_q 与 Re 的关系($l=2.18\text{ mm}$)

3 结 论

本文对水液压微型阻尼孔的水力学特性进行了研究,得出如下结论:

- (1) 无论有无背压,阻尼孔内的气泡首先在进口部位产生,并随着两端压差的增大,气泡向出口推移,且气相体积比随之增大,气蚀也愈发严重。
- (2) 孔径与长径比对阻尼孔的气蚀有较大的影响。孔径大的阻尼孔更易发生气蚀, $l/d=7$ 的阻尼孔的抗气蚀性能最优。
- (3) 背压对阻尼孔气蚀特性存在显著的影响,提高背压有利于抑制气穴现象的发生。
- (4) 相同压差时,阻尼孔的流量与孔径及长径比呈非线性关系;无背压时, $l/d=4$ 或 $l=4\text{ mm}$ 的阻尼孔的流量系数均小于其他系列阻尼孔。
- (5) 背压对阻尼孔流量特性有较大的影响。有背压时,流经阻尼孔的流量大于无背压时的流量,且流量饱和现象比无背压时明显,流量系数高于无背压时的流量系数。

参考文献:

- [1] 弓永军,王祖温,徐杰,等. 先导式纯水溢流阀仿真与试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(24): 136-142.
GONG Yongjun, WANG Zuwen, XU Jie, et al. Simulation and experiments study on water hydraulic pressure relief valve with pilot stage[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(24): 136-142.
- [2] 李晓杰,潘玉田,岳喜凯,等. 导阀参数对先导式减压阀动态特性影响的分析[J]. 太原理工大学学报, 2013, 44(5): 594-597.
LI Xiaojie, PAN Yutian, YUE Xikai, et al. Simulated analysis on the dynamic behavior influence caused by pilot valve parameters upon pilot operated pressure reducing valve[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2013, 44(5): 594-597.
- [3] 刘银水,毛旭耀,吴德发,等. 直动式海水液压溢流阀的设计与仿真[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(9): 125-128.
LIU Yinshui, MAO Xuyao, WU Defa, et al. Design and simulation of a seawater hydraulic relief valve[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(9): 125-128.
- [4] 张增猛,周华,陈英龙,等. 纯水比例溢流阀控制特性与补偿方法的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(11): 2093-2099.
ZHANG Zengmeng, ZHOU Hua, CHEN Yinglong, et al. Research on control characteristic and compensation of water hydraulic proportional pressure relief valve[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(11): 2093-2099.
- [5] LIU Yingshui, WU Defa, LONG Lei, et al. Research on the port valve of a water hydraulic axial pump[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part E Journal of Process Mechanical Engineering, 2009, 223(3): 155-166.
- [6] 杨华勇,周华. 水液压技术研究新进展[J]. 液压与气动, 2013(2): 1-6.
YANG Huayong, ZHOU Hua. New achievements in water hydraulics[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2013(2): 1-6.
- [7] 李如平,聂松林,易孟林. 固定阻尼孔影响水压伺服阀静态特性试验研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(6): 1-673.
LI Ruping, NIE Songlin, YI Menglin. Experimental research on the static characteristics of water hydraulic servo valve caused by fixed damp orifice[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(6): 1-673.
- [8] 朱碧海,何伟,贺小峰,等. 膜片式先导水压溢流阀仿真与试验研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(2): 179-185.
ZHU Bihai, HE Wei, HE Xiaofeng, et al. Simulation and experimental study of pilot operated water hydraulic pressure relief valve with diaphragm seal[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(2): 179-185.
- [9] ZHU Bihai, HUANG Yan, ZHANG Tiehua, et al. Experimental investigation of the flow characteristics of small orifices and valves in water hydraulics[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part E Journal of Process Mechanical Engineering, 2002, 216(4): 235-245.
- [10] LIU Yinshui, ZHU Bihai, ZHU Yuquan, et al. Flow and cavitation characteristics of a damping orifice in water hydraulics[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2006, 220(8): 933-942.
- [11] DABIRI S, SIRIGNANO W A, JOSEPH D D. Cavitation in an orifice flow[J]. Physics of Fluids, 2007, 19(7): 072112.
- [12] YAMAGUCHI A, SAITO H. Cavitation in hydraulic fluids: Part V Effects of fluid properties and orifice materials on cavitation in long orifices[J]. Journal of Fluid Control, 1988, 18(1): 19-33.

[本刊相关文献链接]

- 刘瑞春,张怀亮,李卫. 基础振动下电磁换向阀压力流量特性研究. 2017, 51(11): 79-86. [doi:10.7652/xjtuxb201711012]
- 孙红霞,苏军伟. 亚网格内两相流动界面位置的精确定位算法. 2017, 51(1): 79-87. [doi:10.7652/xjtuxb201701013]
- 王红娟,屠珊,杜洋,等. 联合进汽阀内部流场三维数值模拟及阀碟受力分析. 2016, 50(12): 148-154. [doi:10.7652/xjtuxb201612023]
- 苟军利,单建强,胡宏伟,等. 先进安注箱热工水力特性研究. 2015, 49(11): 116-121. [doi:10.7652/xjtuxb201511019]
- 张虹虹,李泽清,吴博,等. 气动元件流量特性分析及实验研究. 2015, 49(8): 64-68. [doi:10.7652/xjtuxb201508011]
- 梁法春,王栋,杨桂云,等. 气液两相流临界分配特性及相分离控制. 2015, 49(1): 53-58. [doi:10.7652/xjtuxb201501009]
- 翟强,闫柯,张优云,等. 高速角接触球轴承腔内气相流动与传热特性研究. 2014, 48(12): 29-33. [doi:10.7652/xjtuxb201412005]
- 闵为,冀宏,王峥嵘,等. 单级压力调节阀的阻尼孔射流响应特性分析. 2014, 48(6): 80-85. [doi:10.7652/xjtuxb201406014]

(编辑 武红江)