

渐扩型流道空化特征的实验研究

赵鹏坤 林言丕 李清华 郑直

(兰州理工大学 能源与动力工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘要: 渐扩型流道是液压元件中最常见的一种阀口结构,为了研究渐扩型阀口结构中的空化流动特征,该文设计了一种渐扩型阀口流道结构,通过实验研究了随进口压力的提升,阀口空化现象的变化。实验研究发现,空化首先出现在阀口拐角上侧;随着进口压力的提升,空化体积向着类三角形形态发育;渐扩型阀口空化体积随进口压力的提升,呈线性分布。

关键词: 渐扩型流道;进口压力;线性分布;研究

中图分类号: TH137 文献标志码: A 文章编号: 1008-0813(2020)03-0016-04

Experimental Research on Cavitating Characteristics of the Gradually Expanding Channel

ZHAO Peng-kun, LIN Yan-pi, LI Qing-hua, ZHENG Zhi

(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to study the characteristics of cavitating flow in the structure of gradually expanding valve orifice, this paper designs a structure of gradually expanding valve orifice, and studies the change of valve orifice cavitation with the increase of inlet pressure through experiments. The experimental results show that the cavitation first appears at the upper corner of the valve mouth; with the increase of the inlet pressure, the cavitating volume develops toward a triangular shape; and with the increase of the inlet pressure, the cavitation volume of the gradually expanding valve mouth presents a linear distribution.

Key words: gradual expansion channel; inlet pressure; linear distribution; research

0 引言

液压元件在设计之初为了追求更优良的使用性能要求,目标阀体结构设计之初只考虑到液压阀体自身的结构特性,并没有充分考虑或过度简化了阀体内部

流体介质的流动状况。实际上要想实现液压元件的精确控制和节能控制还必须深入研究液压元件内部流体的流动状态。油液介质在复杂、密闭空间内的流动会出现多变而复杂的流动现象,诸如流体中常见的气穴、涡旋、脉动、射流等现象都会使液压系统的控制精度降低、能量消耗巨大;这些流动现象也是造成液压系统产生噪声和振动的根本原因。国内外对液压元件中的空化现象作了大量研究。SHIGERU O^[1-2]采用半剖式锥阀模型研究了锥阀空化流动,指出锥阀结构不同、流向不同,压力分布、气穴、流量特性和噪声都有明显的差

收稿日期: 2019-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(51465033)

作者简介: 赵鹏坤(1990-),男,山东枣庄人,在读研究生,主要从事基础液压件研究。

(1) 单向阀阀芯半锥角以及密封宽度对密封性能影响较大;

(2) 单向阀的弹簧影响其密封效果,也影响开启动作最低压力,在满足必需的密封条件下,弹簧的弹力应尽可能低;

(3) 采用复合式密封方式,可以有效提高按高压设计的单向阀在低压时的密封效果。

参考文献

[1] 王正祥. 一种系列气动单向阀的设计[J]. 液压气动与密封 2010 (02): 62-66.

封 2010 (02): 62-66.

[2] 薛娟娟. 超高压液控单向阀的设计与开发[J]. 液压气动与密封 2017 (07): 74-77.

[3] 杨源泉. 阀门设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社 2000.

[4] 闵为. 影响锥阀阀芯轴向振动的关键因素[J]. 液压与气动 2017 (06): 39-42.

[5] 倪平. 阀门密封比压计算式的探讨[J]. 阀门 2018 (01): 31-36.

[6] 阮跃进. 高压气体安全阀的设计[J]. 液压气动与密封, 2012 (07): 40-42.

异。冀宏^[3]等对节流槽型阀口噪声特性实验研究发现节流槽阀口噪声与流场压力分布特征密切关联,噪声主要取决于节流槽形状、流动方向及背压大小,渐扩形节流槽容易出现啸叫。闵为^[4]等在低压条件下对锥阀振荡空化作了可视化实验研究,发现阀芯的振荡型态与流量密切相关。杨来国^[5]等对单向阀进行了气穴涡旋的分析发现阀芯的拐角处易产生旋涡并有气体析出,产生空化旋涡易发生气蚀和气穴现象,并使阀芯剧烈的振荡。

而上述阀口流道均可以看作渐扩型流道,渐扩型流道是液压元件中最常见的一种阀口结构,其中锥阀,滑阀(非全周开口V型节流阀)的阀口结构均是典型的渐扩型阀口结构,研究渐扩型流道内的空化流动特性,对提升锥阀及V型节流槽滑阀^[6]的工作性能有着重要的作用。实验研究是最直观,有效的方法。本文设计了二维渐扩型阀口结构,研究了阀口开度不变的情况下,渐扩型流道内,空化体积与进口压力(压差)的关系。

1 实验模型

渐扩型流道是液压元件中最常见的一种阀口结构,滑阀^[3]、锥阀^[4]中渐扩型阀口结构,如图1所示。

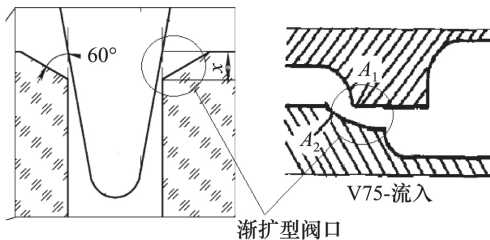


图1 液压元件中的渐扩型结构

图1 液压元件中的渐扩型结构

为了更好地研究渐扩型阀口空化流动的特征,针对液压元件中常见的渐扩型阀口结构设计实验模型,实验模型流道几何结构如图2所示。

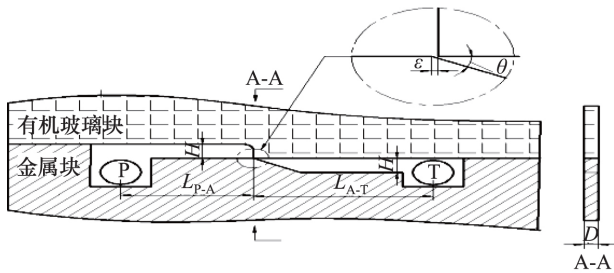


图2 流道几何结构

图中P口为进口;T口为出口; H 为流道高度, 7 mm ; D 为流道宽度 4 mm ; ϵ 为阀口开度 0.5 mm ;

θ 为阀口倾角 30° ; L_{P-A} 为进口至阀口的距离, $L_{P-A} = 5H$; L_{A-T} 为阀口至出口的距离, $L_{A-T} = 6H$ 。阀口与进出口采用大间距布置避免了进、出口距离阀口过近影响实验现象的观测。

实验模型整体结构如图3所示。观测窗口位于实验模型的中间区域,开度为 $56\text{ mm} \times 20\text{ mm}$,内置透明度可达90%以上的有机玻璃(PMMA),阀口位于观测窗口中心。透光孔开度为 $47\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,其厚度比内流道有机玻璃(模拟阀套)厚度小 1 mm 。这种设计的好处在于:可以有效地防止油液泄漏进入透光孔,影响透光效果;较小的透光孔可以使光束收缩,使得内流道区域光亮更充分,这有利于高探照光源以侧光的形式通过上流道有机玻璃进入流道内部。当流道内部发生空化时,借助空泡对光的散射作用,使空化现象更加清晰。这两点都有助于实验现象的观测和拍摄。

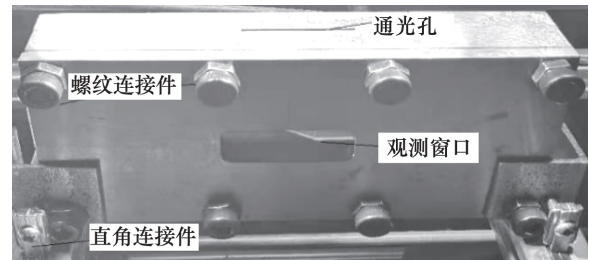


图3 实验模型整体结构

表1给出了实验时,实验条件实时采样值。

表1 流进方向实验参数

油温($^\circ\text{C}$) ± 0.5	24	24	24	24	24	24	24	24
进口压力(MPa)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
出口压力(MPa)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

2 实验现象研究

实验静态图像如图4a;当进口压力为 1 MPa 时,阀口流道油液中开始出现微弱的空化现象,空化溃灭后形成微小的雾状空化,雾状空化形态随着油液沿下流道斜面流出,如图4b。当进口压力提升到 1.5 MPa 时,上流道拐角处出现清晰可变的空化点,空穴运动紧贴下流道斜面,如图4c。进口压力提升到 2.0 MPa 时,上流道拐角处空化点有所增大,空化溃灭变得剧烈。如图4d。当进口压力为 2.5 MPa 时,下流道斜面处的空化区域向着类三角形形态发育,如图4e。进口压力达到 3.0 MPa 时,下流道斜面处类三角形空化区域发育

完成。如图4f。当进口压力为3.5 MPa时,类三角形空化区域范围继续增长,如图4g。当进口压力达到4.0 MPa时,类三角形空化区域范围进一步增长,如图4h。进口压力为4.5 MPa,类三角形空化区域范围增大,如图4i所示。

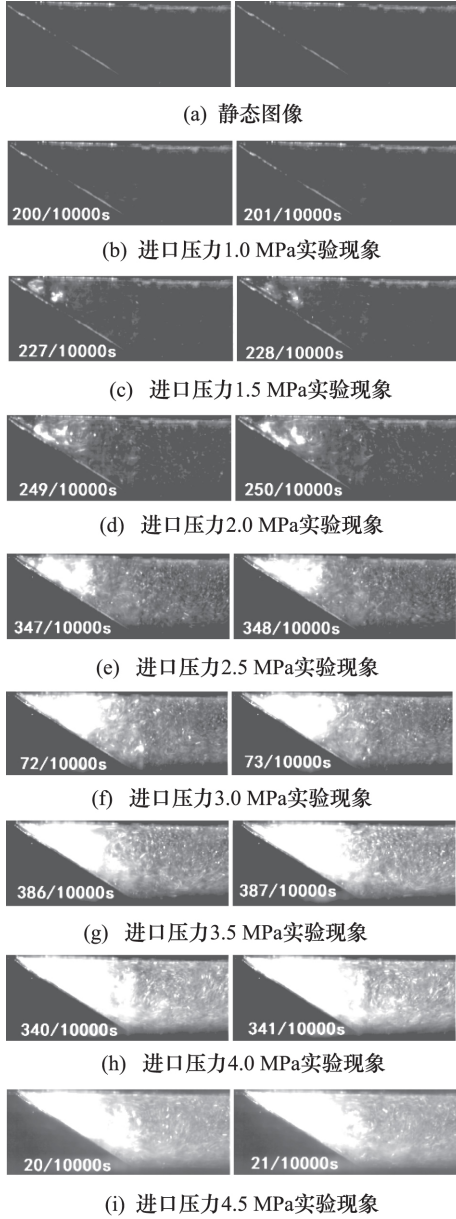


图4 不同进口压力下的实验现象

实验观测发现,渐扩型阀口空化体积的增长与进口压力的提升有关。为了进一步明确空化体积与进口压力之间的关系,对进口压力1.0 MPa、1.5 MPa、2.0 MPa、2.5 MPa、3.0 MPa、3.5 MPa、4.0 MPa、4.5 MPa下的同时间节点的瞬态图像进行分析,定性来说,空化体积与进口压力呈线性分布规律,如图5所示。

为了更好地研究阀口空化体积随压差的变化规

律,将实验图像主空化区的尾部与阀口之间的距离定义为附着空化长度 L_c (length of cavitation)^[7-8]。流道内附着空化区域的最大长度定义为 L_{cm} ,平均空化长度用 \bar{L}_c 表示,空化区域的厚度为 L_{ct} ,厚度垂直于阀套平面,如图6所示。

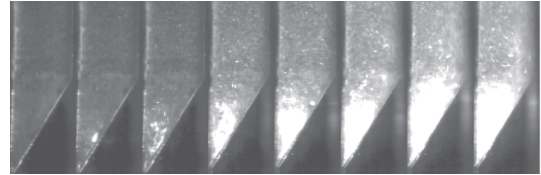


图5 阀口空化程度随进口压力增强的瞬态图像

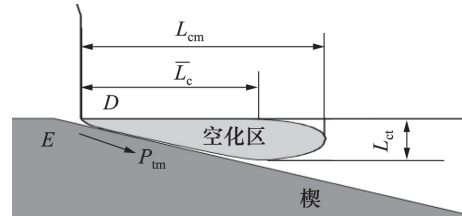
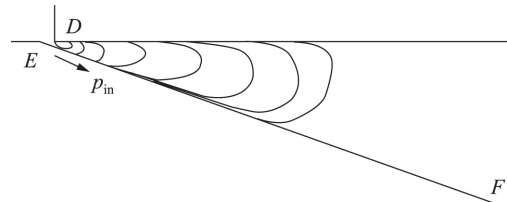


图6 扩张段空化长度与厚度的表示

为明确实验中空化体积随进口压力(压差)的变化趋势,对其空化长度和空化厚度进行实测,其空化长度与空化厚度均是沿平行于渐扩型阀口平面测量的。随着进口压力的增大,空化区域范围逐渐增长。空化区域的变化示例图如图7所示。



(进口压力从左到右依次为:1.0 MPa、1.5 MPa、2.0 MPa、2.5 MPa、3.0 MPa、3.5 MPa、4.0 MPa、4.5 MPa)

图7 不同进口压力条件下的空腔轮廓示例图

图7展示了油液在流经渐扩型阀口后空化表面积随进口压力增长的变化趋势,随着进口压力的提升,空化区域的长度和厚度均会增加,但空化区域厚度的变化趋势由于受到渐扩型阀口流道的限制,油液流经阀口后在渐扩型流动区域为非自由流的受限区域,随着进口压力的提升,空化区域厚度沿几何流道增大。此外,随着空化区域的生长,空化闭合处空化腔体的曲率半径也有明显增长。

由于流道厚度较窄,进而可以认为空化区贯穿整个流道厚度方向,因此,对实验中空化区域测量其附着空化长度 L_{cm} 和附着空化厚度 L_{ct} ,进而可以求出其平面

流道内空化区域体积 S 经测量及计算得出结果如图 8 所示。

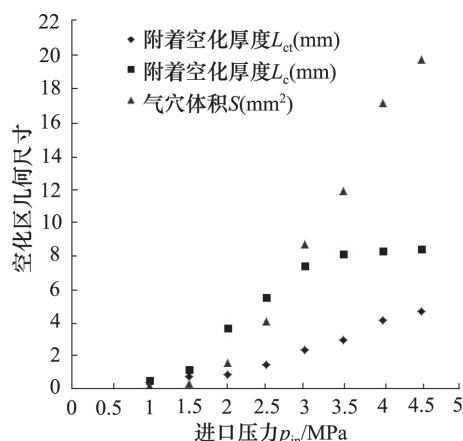


图 8 空化几何尺寸随进口压力的变化趋势

图 8 给出了实验图像空化区几何尺寸的变化趋势,进口压力为 1.0~2.0 MPa 时,空化厚度 L_{ct} 变化缓慢,这是因为进口压力较低,空气吸出较少,导致空化体积生长不明显;当进口压力为 2.5~4.5 MPa 时,空化厚度 L_{ct} 呈线性变化趋势,这是由于随着进口压力的提升,空气吸出含量增多,空化体积充满渐扩型流道,并受到渐扩型阀口几何流道的限制,附着空化厚度随渐扩型阀口几何流道增长。在进口压力较低时,附着空化厚度与附着空化长度基本保持统一尺寸(如进口压力为 1.0 MPa 与 1.5 MPa 时)。在进口压力 3.0 MPa 以下时,空化长度与进口压力基本保持线性增长,而当进口压力在 3.5~4.5 MPa 时,空化长度基本保持不变,这与油液的溶解度有关。而气穴体积 S 在进口压力为 1.0~4.5 MPa 时,大致呈现线性分布规律,这与油液的溶解度、饱和蒸气压及气体的膨胀特性有关。空化体积的变化与图 5 中标定的变化趋势基本一致。

对实验数据测量,效率不高,也很难说明空化体积与进口压力的一般规律。为了进一步探究空化体积与进口压力(4.5 MPa 以下)之间存在的一般性关系,明确空化体积与进口压力之间是否存在普遍线性关系,本文在相同条件下,进行 3 次重复实验,将实验图像进行灰度化处理,灰度化处理选取实验观测的全流道区域,并对灰度图像处理后的灰度均值 G 求时均,得到时均灰度均值 \bar{G} 以研究流道内空化体积随进口压力的宏观变化规律。每个进口压力条件下,从相同时间节点开始选取连续 100 张实验图像的灰度均值 G 并求其平均值,相当于 10 ms 时间段内的时均灰度均值 \bar{G} ,对三次重复实验中各进口压力的实验图像进行批量处理

后,得到了空化体积与进口压力之间存在的普遍关系。从图 9 中可以看出,三次重复实验的结果基本一致,时均灰度均值与进口压力总体上呈线性分布规律。

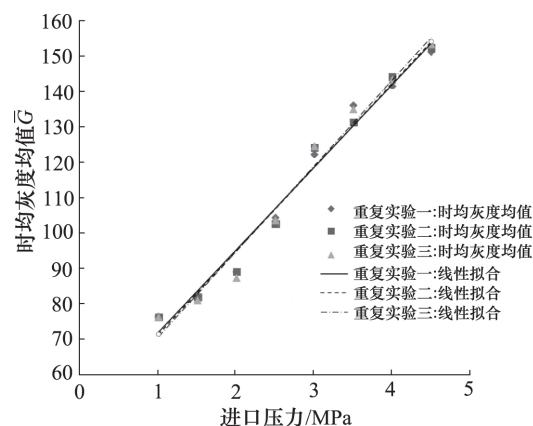


图 9 时均灰度均值与进口压力的关系

3 结论

本文设计了典型渐扩型阀口流道的实验模型,实验观测了空化现象随进口压力的变化,空化现象首先在阀口上流道拐点处出现。结合图像处理技术,研究了空化体积随进口压力变化的一般性变化趋势,研究发现在外部环境保持不变的情况下,油液在流进渐扩型阀口时,空化体积与进口压力在一定压力(4.5 MPa)内呈线性分布规律。

参考文献

- [1] SHIGERU O, TSUNEO I. Cavitation Performance of Oil Hydraulic Poppet Valve [J]. Bulletin and fm of JSME, 1985, 28 (244): 2264-2271.
- [2] SHIGERU O, TIMO L, MATTI L, et al. Effect of Cavitation-water Hydraulic Poppet Valves [J]. International Journal Fluid Power, 2001, 2(3): 5-13.
- [3] 冀宏, 傅新, 杨华勇, 王庆丰. 节流槽型阀口噪声特性实验研究 [J]. 机械工程学报, 2004, (11): 42-46.
- [4] 闵为, 汪东, 郑直, 欧培伟, 冀宏. 低压下锥阀振荡空化的可视化实验研究 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(28): 140-144.
- [5] 杨国来, 靳松, 刘圆圆, 李新峰. 液控单向阀的气穴旋涡现象和流量分析 [J]. 液压气动与密封, 2019, 39(2): 1-3.
- [6] 毕长飞. 节流阀口形状对液压制动系统影响的分析研究 [J]. 液压气动与密封, 2018, (11): 7-12.
- [7] HARISH GANESH, SIMO A, MÄKI HARJU. Bubbly Shock Propagation as a Mechanism for Sheet-to-cloud Transition of Partial Cavities [J]. J Fluid Mech, 2016, 802: 37-78.
- [8] O COUTIER-DELGOSHA, J L REBOUD, Y DELANNOY. Numerical Simulation of the Unsteady Behaviour of Cavitation Flows [J]. Numer Meth Fluids, 2003, 42: 527-548.