

DOI: 10.7652/xjtuxb201910010

液压阀口空气型空化周期特性的实验研究

郑直, 赵鹏坤, 闵为, 冀宏
(兰州理工大学能源与动力工程学院, 730050, 兰州)

摘要: 为了研究大压差、高速瞬变流条件下液压阀口油介质的空气型空化现象与水介质空化存在的差异,明确液压阀口空气型空化流动的形态及周期性行为,建立了可进侧光的可视化实验模型。实验模型将非全周开口 V 型节流槽阀口结构放大 2.8 倍,并采用研合面密封,使得实验模型承压能力可达到 4.5 MPa。通过对高速摄像机获取的实验图像进行灰度化处理,并依据本生溶解度、饱和蒸气压及斯特劳哈尔数研究了不同压差条件下油介质空化流动的周期特性。实验研究表明:当压差在 2.0 MPa 以上时,油液流经 V 型阀口后会同时存在清晰的附着空化、云状空化和雾状空化;当压差在 2.0~3.0 MPa 时,空化流的演化由空气的析出机制主导,空泡的惯性与流动的周期随压差增大而增长的规律与水空化流动相似;压差增大至 3.5~4.5 MPa 时,气体膨胀机制对空化流的演化起重要作用,附着空化的周期基本不变,这与水空化流动的特性不同。

关键词: 油介质;空化流动;雾状空化;本生溶解度;气体膨胀

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)10-0072-07

An Experimental Investigation on Periodic Characteristics of Gaseous Cavitating Flow in Hydraulic Valve Orifices

ZHENG Zhi, ZHAO Pengkun, MIN Wei, JI Hong
(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050 China)

Abstract: A visual experimental model with sheet light is established to study the difference between oil's gaseous cavitation and water's vaporous cavitation in hydraulic valve orifice under a high pressure difference and a high speed transient flow condition and to clarify the shape and periodic behavior of gaseous cavitating flow in hydraulic valve orifice. The experimental model enlarges the structure of V-shaped throttle groove with non-full-cycle opening by 2.8 times, and adopts lapping surface seal to ensure the pressure bearing capacity up to 4.5 MPa. Experimental images obtained by a high-speed camera are grayed and scaled by gray processing, and the cavitation types of valve ports under different pressure gradients and the periodic characteristics of cavitating flow in oil media under different pressure differences are studied based on Bunsen solubility, saturated vapor pressure and Strauhal number. Experimental results show that attached cavitation, cloud cavitation and atomized cavitation concurrently appear in the V-shaped valve orifice when the pressure difference is above 2.0 MPa. When the pressure difference is in the range of 2.0 MPa to 3.0 MPa, the evolution of cavitating flow is dominated by the mechanism of air release. The law that the inertia of cavitation and the period of flow increase with the

increase of pressure difference is similar to water cavitation. However, when the pressure difference increases to the range of 3.5 MPa to 4.5 MPa, the gas expansion mechanism plays an important role in the evolution of cavitating flow, and the period of the attached cavitation is basically unchanged, and is different from that of water cavitating flow.

Keywords: hydraulic oil; cavitating flow; atomized cavitation; Bunsen solubility; gas expansion

空化现象按其形成物理机理的不同可分为蒸汽型空化和空气型空化。水介质的空化现象为蒸汽型空化,其物理机理为水与水蒸汽之间的相变过程,而油介质的空化现象为空气型空化,其物理机理为空气从油中释出和向油溶解的过程。从物理机理上看,油介质空化与水介质空化有本质的不同。

液压系统中的空化现象很早就被发现,国内外学者对液压阀中的空化现象做了许多研究。Ohima 等利用半切阀模型对锥阀空化流动进行了研究,指出锥阀的流向不同,其压力分布、气穴、流量特性和噪声都有明显的差异,并进一步研究了阀座倒角、阀芯锥角、油温等因素对锥阀特性的影响^[1-4]。Washio 等对液压油空化初生进行了研究,结果表明在空化初生阶段,进口边总会出现一个稳定的显微镜可以观测的气穴区,并认为分离点的剪切应力对初始空化的形成起重要作用^[5]。冀宏等研制了阀套可移动式测量装置,对液压阀芯节流槽的压力分布、气穴流动和噪声频谱进行了实验研究,并随后提出一种液压阀口气穴流动的平面观测方法^[6-8]。丁大力通过实验验证了简化的二维模型与原阀在对称面上的二维流场相似性较好^[9]。杜学文等采用流动检测、流场数值解析和噪声分析相结合的方法,从流场的微观角度深入研究流道形状、压力梯度、流场流态和空化现象之间的关系^[10]。傅新等研究了节流槽阀内陡变压力梯度下的流动特性,实测了压力分布,以高速摄像机观测了空化流动的初生、溃灭形态^[11]。陆亮等针对常用的非全周开口阀口中的空化流动及噪声问题进行了流动空化噪声、大尺度空化结构动力学和空化剪切流自激振荡等问题研究^[12]。吉晨围绕受限制空间中的气泡行为开展了数值模拟和实验研究,揭示了管道内单空泡/双空泡动力学行为机理^[13]。易达云采用宏观与微观相结合的手段,深入地研究了锥阀振动所形成的振荡流场中空化噪声的增强机制和流体自持振荡所形成的高频啸叫噪声对特定频率噪声的选择性放大机理^[14]。闵为等对低压条件下锥阀振动作了可视化实验研究,结果表明阀芯的振荡形态与流量密切相关^[15]。郭关柱等研究了空气在二甲基硅油和油液中的溶解度,提出油

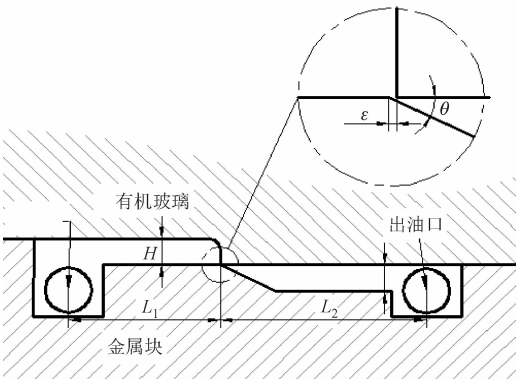
液溶解度适合采用本生(Bunsen)溶解度解释,空气在油中的溶解度呈线性分布规律^[16]。

本文通过可视化实验模型研究油液中空气型空化现象,发现空化区气体会受到油液含气总量的限制,当油液中所含空气被大量吸出后,空泡的膨胀性对空泡体积的变化起到越来越大的作用。

1 实验模型的建立

1.1 可进测光的二维阀口实验模型

参照非全周开口 V 型节流槽结构(D60H25L5, V 型节流槽夹角 60°,节流槽深度 2.5 mm,槽长 1.5 mm)^[6]设计可进侧光源的二维可视化实验模型。为了使实验现象便于观测,降低理论研究的困难程度,将节流槽对称面的阀口尺寸放大 2.8 倍,并保留节流槽主要的结构特征;忽略 V 型槽加工圆弧建立可视化实验模型。该实验模型的流道几何结构如图 1 所示。



H: 流道高度;ε: 阀口开度;θ: 阀口锥角;
L₁: 进口口至阀口的距离;L₂: 阀口至出口口的距离

图 1 流道几何结构

实验模型流道的几何结构参数如表 1 所示。

为了使流道流动特性稳定,避免进、出口影响实验现象的观测,进口口与阀口的间距取 $L_1 = 5H$, 阀口与出口口的间距取 $L_2 = 6H$ 。

实验模型爆炸图如图 2 所示。实验模型上流道采用透明度可达 90% 以上的有机玻璃(PMMA)用以模拟实际阀套,上流道采用有机玻璃的优势在于光源可以以侧光的形式通过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,

表 1 流道几何结构参数

参数	数值
流道高度 H/mm	7
进口口至阀口的距离 L_1	$5H$
阀口至出油口的距离 L_2	$6H$
流道厚度 D/mm	4
阀口开度 ε/mm	0.5
阀口锥角 $\theta/(\text{^\circ})$	30

使阀口处空化现象更加清晰。下流道采用 45 # 钢加工,模拟阀芯结构。流道宽度取值较小,气泡表面对光的散射作用强于油液,故散射光基本可认为是由整个流道厚度内的气泡所贡献。实验模型实物图如图 3 所示。

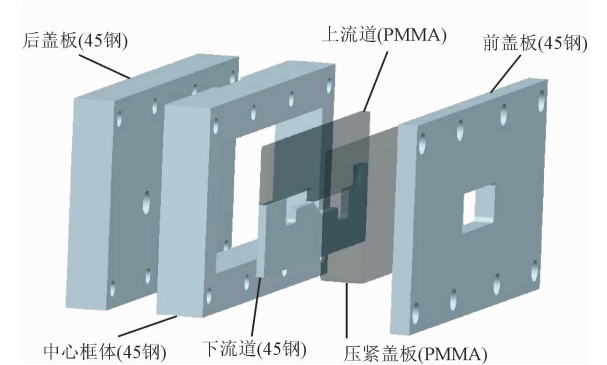


图 2 实验模型爆炸图

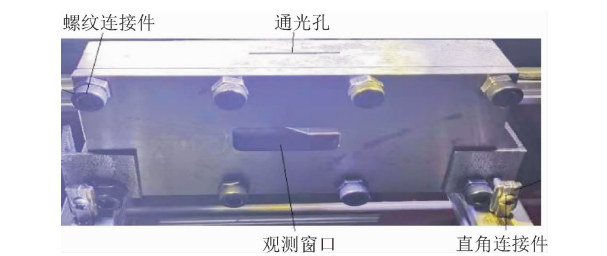


图 3 实验模型实物图

1.2 实验模型的密封与承压

实验模型为流道跨度较长的矩形结构,且上、下流道表面间存在一定的精度误差。若模型型面间采用密封圈密封(如图 4 所示),O 型环装入密封沟槽后,在压紧力的作用下,O 型环截面会受到 15%~30%的压缩变形,O 形环压缩变形余量使实验模型盖板与流道连接面间存在间隙(Δ),造成实验模型高、低压腔串油现象,使得空化现象难以出现。

为避免实验模型高、低压串油现象的发生,实验模型只采用研合面密封,并辅助使用合适的紫铜片来弥补加工的尺寸差值,利用紫铜的延展性来实现实验模型的密封。

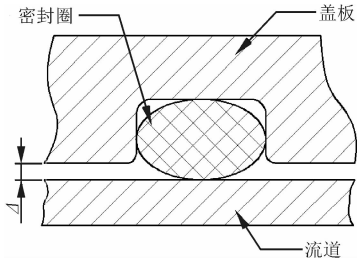


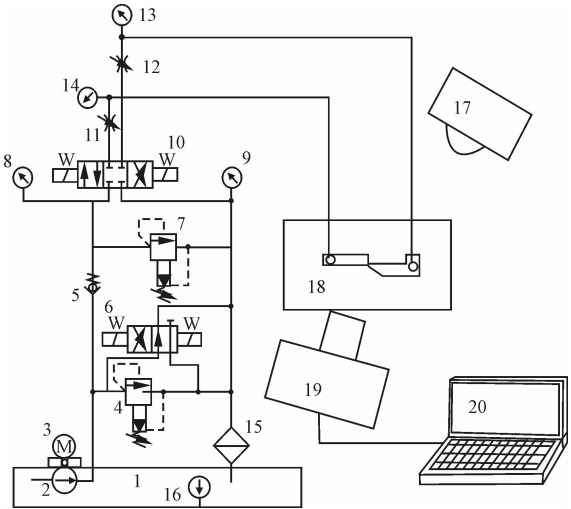
图 4 密封圈密封示意图

有机玻璃(PMMA)的抗拉强度可达 70 MPa,由于 PMMA 为脆性材料,安全系数取 4,则材料可承受高达 17.5 MPa 的压力^[17]。沿实验模型流进方向,高压区上流道有机玻璃开设了大倒角,以减小应力集中。观测窗口处无金属盖板压紧,因此选取厚度达 21 mm 的有机玻璃作压紧盖板,如图 2 所示。较大厚度的压紧盖板可提升实验模型的承压能力,但实验过程中系统启闭过程中压力波动等因素会对压紧盖板性能产生负面影响,导致强度下降等问题的发生。实验过程中,流道内压力一般控制在 5 MPa 之内。

2 实验系统与数据记录

2.1 实验系统

实验系统如图 5 所示。实验时,先对液压系统进行压力设定,定量泵在电动机的带动下,向液压系统恒定输出 15 L/min 的流量。当泵开启时,调节电磁换向阀 6,保持电磁换向阀 10 的初始位置不变,使液压系统构成回路。通过溢流阀 4、7 保证液压系



1: 油箱;2: 定量泵;3: 电动机;4、7: 先导式溢流阀;5: 单向阀;6、10: 电磁换向阀;11、12: 节流阀;8、9、13、14: 压力表;15: 回油过滤器;16: 温度计;17: 光源;18: 实验模型;19: 高速摄像机;20: 计算机

图 5 实验原理图

统在实验过程的安全,维持压力恒定。通过压力表 8、9 保持液压系统流进实验模型的压力恒定。实验过程中,首先将节流阀 11 关闭,节流阀 12 调制最大开度,然后正向开启电磁换向阀 10,缓慢开启节流阀 11,使压力表 14 压力逐步提升到实验所需压力。待空化现象出现,保持节流阀 11 开度不变,开启光源 17、高速摄像机 19 和计算机 20 记录实验数据。实验拍摄选用的高速摄像机型号为 Phantom V1210,高速摄像机拍摄速率 10 000 帧/s,两帧之间的时间间隔为 0.1 ms。微距镜头为佳能 MACRO 100 mm。

本次实验采用 L-HN 46 抗磨液压油,该液压油无水分含量,无机械杂质,油液物性参数如表 2 所示。

表 2 油液物性参数

参数	数值
密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	869
运动黏度 $\nu/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	4.66×10^{-5}
色度	<0.5

2.2 数据记录

实验中,保持出口表压恒定为 0 Pa,当进口表压提升至 2 MPa 时,阀口处开始出现明显的空化现象。因此,实验由进口压力 2.0 MPa 开始,每提升 0.5 MPa 记录一次实验数据,提升至 4.5 MPa 结束,共记录压差为 2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5 MPa 这 6 组实验数据。每组实验在调整好进口压力后,维持 1~2 min,待流道内部瞬态涡旋现象进入拟稳态后开始记录实验数据。每组实验采样并存储 1 s 即 10 000 张图像数据。实验中,相同压力条件进行 3 次重复实验,以确定实验现象的可重复性和稳定性。

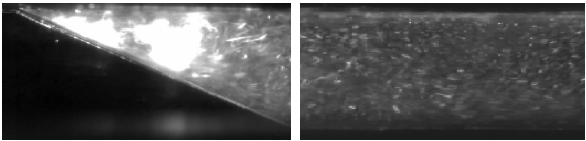
油液中的空气含量可以用本生溶解度 δ 表示,油液的本生溶解度表示为^[16]

$$\delta = \left[\exp \left(-a + \frac{b}{T} \right) \right] P_s / P_0 \tag{1}$$

式中: a 、 b 为常数; T 为温度,单位 K; P_s 为溶解度 δ 时油液的饱和蒸气压; P_0 为 101.3 kPa。依据文献[16]的研究结果,气体在油液中的本生系数与温度之间符合指数递减关系,温度升高,本生溶解度降低,油液中的空气析出增加,空化加剧;反之,油液中的空气析出变弱,空化减弱。本实验研究压差对阀口空化现象的影响,因此在实验过程中,尽量控制使油温保持恒定,每组实验过后,均停机冷却。实验过程中,油箱油温始终维持在 $(24 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 的范围内。分析实验现象时忽略油温变化对空化流动的影响。

3 实验现象与分析

为了研究方便,将流道分为两部分。以流道斜面拐角为分界点,将下流道斜面拐点前段定义为扩张段,拐角点后段定为均匀段。扩张段主要由附着空化和云状空化组成;均匀段由大量、微小的雾状空泡组成。流道分布图形如图 6 所示。



(a)扩张段 (b)扩张段
图 6 流道分布图形

3.1 空化现象及分析

实验中阀口处油液流动均处于紊流流态,依据文献[18],阀口流量和阀口压差的关系如下

$$q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \tag{2}$$

式中: q 为流量; ΔP 为进、出口压差; A 为阀口面积; ρ 为油液密度。阀口处于小开度时(流入方向,阀口开度小于 2 mm),流量系数 C_d 接近于 1^[16]。小开度阀口的参考速度 V_{ref} 为

$$V_{\text{ref}} = \frac{q}{A} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \tag{3}$$

图 7 给出了不同压差的瞬时实验图像。由图 7a 可以看出,压差为 2.0 MPa 时,阀口处附着空化、云状空化明显,均匀段雾状空泡清晰可辨,涡旋在雾状空泡的作用下更加清晰。由图 7b 可以看出,当压差提升至 2.5 MPa 时,扩张段阀口处附着空化与脱落的云状空化向阀口后部推移,阀口处的空化向着类三角形形态发育,均匀段雾状空泡更加明显,涡旋由扩张段向均匀段推移。由图 7c 可见,当压差达到 3.0 MPa 时,阀口处扩张段附着空化类三角形形态基本发育完成,均匀段涡旋尺度呈增大的趋势。由图 7d 可见,当压差为 3.5 MPa 时,扩张段类三角形空化进一步增强,均匀段雾状空泡更加明显。由图 7e 可见,当压差达到 4.0 MPa 时,类三角形空化区域逐渐布满整个扩张段,雾状空泡充满整个均匀段,涡旋的尺度和流速均有增大。由图 7f 可见,当压差为 4.5 MPa 时,类三角形空化区域继续增大,涡旋尺度增大并接近整个流道高度。

随着压差、流速的提升,附着空化体积增大,云状空化及其涡旋向均匀段推移。当压差达到 3.5 MPa 时,均匀段呈现与流道高度可比拟的大尺度涡旋;当

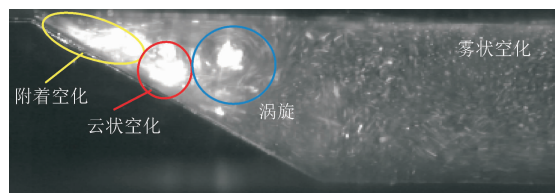
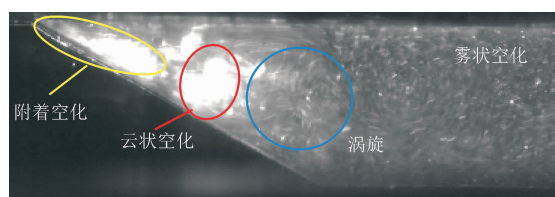
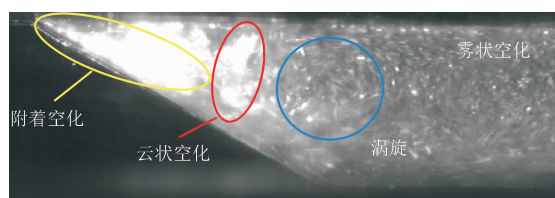
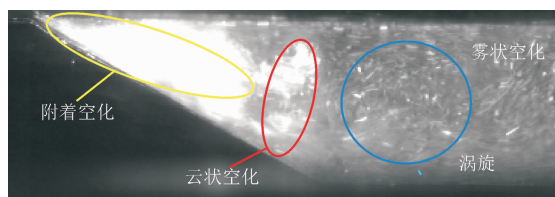
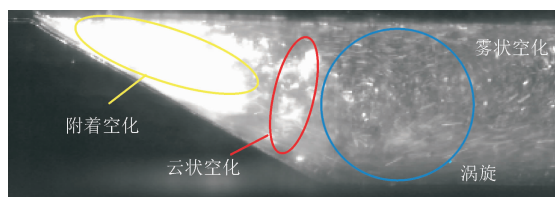
(a) $\Delta P = 2.0 \text{ MPa}$, $V_{\text{ref}} = 67.8 \text{ m/s}$ (b) $\Delta P = 2.5 \text{ MPa}$, $V_{\text{ref}} = 75.9 \text{ m/s}$ (c) $\Delta P = 3.0 \text{ MPa}$, $V_{\text{ref}} = 83.1 \text{ m/s}$ (d) $\Delta P = 3.5 \text{ MPa}$, $V_{\text{ref}} = 89.8 \text{ m/s}$ (e) $\Delta P = 4.0 \text{ MPa}$, $V_{\text{ref}} = 95.9 \text{ m/s}$ (f) $\Delta P = 4.5 \text{ MPa}$, $V_{\text{ref}} = 101.8 \text{ m/s}$

图7 不同压差条件下实验阀口流进方向的瞬态图像

压差达到 4.5 MPa 时,在实验曝光条件 10 000 帧/s 下,雾状空化运动轨迹伴有明显的尾迹现象。

实验发现:油介质中,空泡溃灭后气泡不会全部快速溶入油液,而是在均匀段形成大量、微小的雾状

空泡。由式(1)可知,当温度一定时,油液的本生溶解度与饱和蒸汽压成线性关系^[16]

$$\delta = \delta_0 \frac{P_s}{P_0} \quad (4)$$

由式(4)可知:油液本生溶解度越大,对应的饱和蒸汽压越高,空气越难溶入油液;反之,油液本生溶解度越小,对应的饱和蒸汽压越低,空气越难从油液中析出。 P_s 随油液当地的本生溶解度而变化是油空化现象的重要特征。

均匀段微小的雾状空泡不会全部快速的溶入油液,这是因为扩张段空化溃灭进入均匀段以后,随着均匀段压力的恢复,阀口低压处析出的空气大部分都溶回油液,形成云状空化的溃灭。溶入油液的空气使得油液的本生溶解度增高,饱和气压上升,随着油液本生溶解度与饱和气压的恢复,其值越来越接近于常温常压下静置油液的 δ_0 与 P_0 ,这使得微小空泡溶入油液的过程越来越慢。均匀段未能及时溶入油液的空气以微小雾状气泡存在于油液中,并随油液对流。与水介质的空化流动相比,水空化属于相变型空化,一旦流体对流至压力恢复区域,压力达到相变压力(3 kPa)之上,蒸汽泡就会快速凝结,因此很少见到相变型空化对雾状空化现象的报道。

3.2 扩张段空化流动的周期性变化

随着进出口压差的提升,流道内空化程度也随之增强。将流道内扩张段的附着空化与云状空化综合考虑,定义流道内的气穴体积占比 S 为

$$S = \int_{\tau} \alpha \Delta \tau \quad (5)$$

式中: α 为气泡的体积分数; $\Delta \tau$ 为流道体积微元; τ 为流道体积。本文认为流道中气泡的总量正比于流道内气穴体积占比 S 。假设散射光强正比于气泡的数量,可利用图像的灰度来量化流道内气穴体积占比 S ,进而量化空化的剧烈程度。

灰度值量化为 256 个灰度级,灰度值 i 的范围为 0~255,表示亮度由弱到强,对应图像的颜色由黑到白。实验图像的灰度处理的区域如图 8 所示。

首先,用 Matlab 求取实验图像流道区域(框线内)的灰度频率分布直方图,再利用频率分布直方图

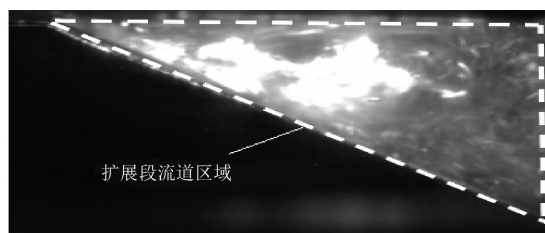


图8 灰度处理的扩张段区域

求出对应的流道区域灰度均值 G 。灰度均值与灰度频率分布的计算关系如下

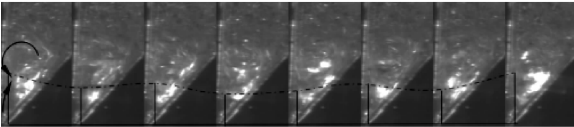
$$G = \sum_{i=0}^{255} p(i)i \tag{6}$$

式中: $P(i)$ 为图像中灰度值 i 出现的频率, i 为图像中一点的灰度值。当 $G=0$ 时, 图像颜色为纯黑; 当 $G=255$ 时, 图像颜色为纯白, G 越大, 图像越亮。如前所述, 我们以流道区域的灰度均值来量化流道内的气穴体积占比, 即引入假设

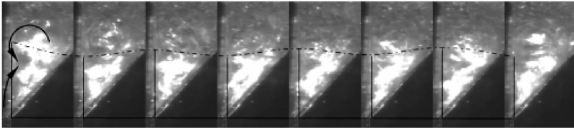
$$S \propto G \tag{7}$$

实验发现, 附着空化的发育及云状空化的脱落、对流及溃灭具有明显的周期性。

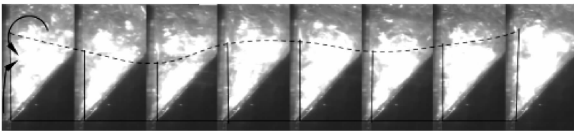
图 9 中展示了连续 8 帧即 0.7 ms 时间段内的阀口空化瞬态图像。实验发现, 附着空化的尾流存在一个逆时针旋转的涡旋, 此涡旋在流道的上壁面沿壁面回流, 与阀口来流对撞后, 两股流动汇为一股



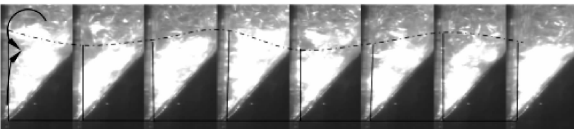
(a) $\Delta P=2.0$ MPa, $V_{\text{ref}}=67.8$ m/s



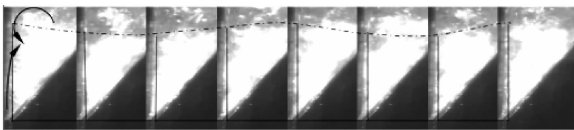
(b) $\Delta P=2.5$ MPa, $V_{\text{ref}}=75.9$ m/s



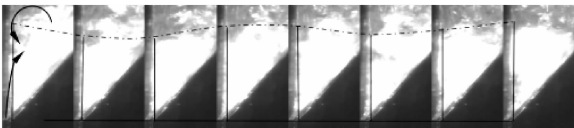
(c) $\Delta P=3.0$ MPa, $V_{\text{ref}}=83.1$ m/s



(d) $\Delta P=3.5$ MPa, $V_{\text{ref}}=89.8$ m/s



(e) $\Delta P=4.0$ MPa, $V_{\text{ref}}=95.9$ m/s



(f) $\Delta P=4.5$ MPa, $V_{\text{ref}}=101.8$ m/s

图 9 阀口空化流动的周期性变化

垂直于上壁面方向的流速, 切断附着空化, 切断的空泡群形成脱落的云状空化, 并于对流至下游的过程中溃灭, 形成雾状空化。

为了研究阀口空化流动的周期性变化规律, 将附着空化尾部的切断处 (即沿上壁面方向流动的驻点处) 与阀口之间的距离定义为附着空化长度 L_c [19-20]。总体来说, 随着压差的增加, 附着空化长度 L_c 增长, L_c 随时间变化的周期也增大。通过平均连续 30 帧图像的 L_c , 得到不同压差条件下的平均附着空化长度 $\bar{L}_c$ 。

借助阀口扩张段的空穴体积占比的周期性变化与扩张段区域的灰度值的周期性变化呈正相关性, 所以阀口空化流的周期 T_c 的测量改用扩张段区域内图像灰度的周期性来测量。扩张段区域的选择如图 8 框线内所示。

图 10 中展示了不同压差条件下扩张段灰度均值 G 随时间变化的 3 个连续周期, 进口压力 2.0 MPa 时大约对应 8 帧图像, 而进口压力 4.5 MPa 大约对应 15 帧图像。由图 10 可观察到 T_c 在压差为 2.0 MPa 时约为 0.2 ms 左右, 而在压差为 4.5 MPa 时约为 0.4 ms 左右。对连续 300 帧图像进行灰度化处理后, 再以傅里叶变换求其频谱, 得到平均的周期 $\bar{T}_c$, 如表 3 所示。扩张段空化流动的周期性行为可由斯特劳哈尔数 Sr 描述

$$Sr = \frac{\bar{L}_c}{\bar{T}_c V_{\text{ref}}} \tag{8}$$

式中: $\bar{L}_c$ 为平均附着空化长度; $\bar{T}_c$ 为平均振荡周期; V_{ref} 为参考速度。

由表 3 可以发现: 在压差为 2.0~3.0 MPa 区间, Sr 基本稳定在 0.24 左右, 此压力区间内阀口空化流动的周期性行为与文献中已报导的水空化流动的周期性行为类似, 即随着空化程度的增强, 附着空

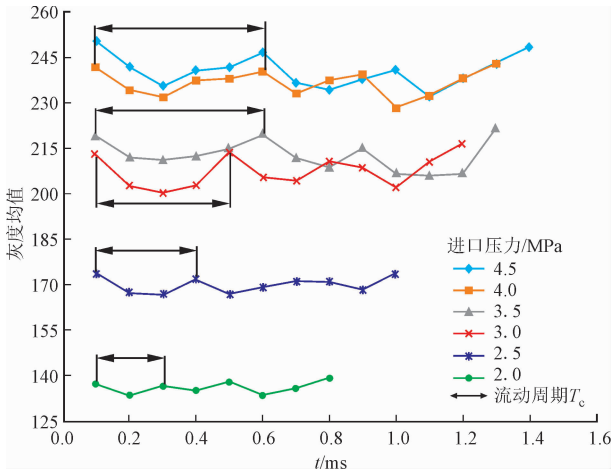


图 10 扩张段灰度均值随时间的周期性变化

表 3 不同压差条件下阀口空化流动参数

$\Delta P/\text{MPa}$	$V_{\text{ref}}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\bar{T}_c/\text{ms}$	$\bar{L}_c/\text{mm}$	Sr
2.0	67.8	0.23	3.7	0.237
2.5	75.9	0.30	5.5	0.242
3.0	83.1	0.36	7.4	0.247
3.5	89.8	0.40	8.1	0.226
4.0	95.9	0.40	8.3	0.216
4.5	101.8	0.43	8.4	0.192

化的尺度增大,脱落的云状空化质量和惯性也增大,周期增长,但斯特劳哈尔数基本保持不变^[19-20];当进口压力进一步增加,压差为 3.5~4.5 MPa 区间,阀口油液的空化流动有着不同的规律,其周期 $\bar{T}_c$ 基本稳定在 0.4 ms,斯特劳哈尔数呈下降趋势。

在压差为 2.0~3.0 MPa 区间,空泡体积的增加是由溶入油液中的空气在低压区析出主导,这与水的相变型空化类似,随着空化数的降低和空化程度的增强,析出的气相物质越来越多,其尺度和惯性增加,周期增长,空穴内的低压保持比较恒定的数值^[20]。在压差为 3.5~4.5 MPa 区间,由于溶入油液中的气体总量有限,随着进口压力的提升,溶入油液的气体不断析出使得油液当地的本生溶解度 δ 降低,饱和蒸气压 P_s 下降,当压差提升到 3.5、4.0、4.5 MPa 时,空气的析出越来越困难,空化呈现饱和趋势。阀口油液空化的饱和现象在文献[7]中也有报导。此时,析出机制的主导作用减弱,而低压造成的空气的膨胀机制作用增强。空泡体积虽然仍在增加,但空泡密度下降,并没有太多新析出的空气加入空泡,其惯性并没有明显增加,所以空化流动的周期增长不大,斯特劳哈尔数呈下降趋势,表现出与水空化流动不同的规律。

4 结 论

对油液流经小开度阀口的空化现象进行了实验研究,得出以下结论。

(1)油液在流经阀口后受到油介质当地本生溶解度 δ 和饱和蒸气压 P_s 的影响,存在附着空化、云状空化和雾状空化。油液在流经 V 型阀口后,附着空化与云状空化随压差的升高,空化形态向类三角形形态发育,雾状空化由于油液本生溶解度及饱和蒸气压的升高而存在于油液之中。

(2)油液中空化流动的周期性变化受油液本生溶解度 δ ,饱和蒸气压 P_s 和气体膨胀特性的影响,呈现两个阶段。在较低的压差条件下,随着压差的增加,空穴体积的增加由析出机制主导,体现出与水

介质空化流动相似的特征。在较高的压差条件下,当压差增加时,析出机制的作用减弱而膨胀机制的作用增强,空泡的惯性增加不大,空化流动周期的变化不大,这一阶段与水空化流动的特征不同。

参考文献:

[1] OSHIMA S, ICHIKAWA T. Cavitation phenomena and performance of oil hydraulic poppet valve; 1st report Mechanism of generation of cavitation and flow performance [J]. Bulletin of the JSME, 1985, 28 (244): 2264-2271.

[2] OSHIMA S, ICHIKAWA T. Cavitation phenomena and performance of oil hydraulic poppet valve; 2nd report Influence of the chamfer length of the seat and the flow performance [J]. Bulletin of the JSME, 1985, 28(244): 2272-2279.

[3] OSHIMA S, ICHIKAWA T. Cavitation phenomena and performance of oil hydraulic poppet valve; 3rd report Influence of the poppet angle and oil temperature on the flow performance [J]. Bulletin of the JSME, 1986, 29(249): 743-750.

[4] OSHIMA S, ICHIKAWA T. Cavitation phenomena and performance of oil hydraulic poppet valve; 5th report Influence of dimensions of valve on the thrust force characteristics [J]. Bulletin of the JSME, 1986, 29(251): 1427-1433.

[5] WASHIO S, TAKAHASHI S, UDA Y. Study on cavitation inception in hydraulic oil flow through along two-dimensional constriction [J]. Journal of Engineering Tribology, 2001, 215(4): 373-386.

[6] 冀宏. 液压阀芯节流槽气穴噪声特性的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 41-45.

[7] 冀宏, 傅新, 杨华勇, 等. 节流槽型阀口噪声特性试验研究 [J]. 机械工程学报, 2004, 40(11): 42-46.

JI Hong, FU Xin, YANG Huayong, et al. Experimental study on noise characteristics of groove-type orifices [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(11): 42-46.

[8] 冀宏, 李亚, 张继环, 等. 液压阀口气穴流动的平面观测方法 [J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(5): 51-54.

JI Hong, LI Ya, ZHANG Jihuan, et al. Planar observation method of cavitating flow near hydraulic valve orifice [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2010, 36(5): 51-54.

[9] 丁大力. 液压阀节流槽内气穴气泡生长特性的研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2009: 29-33.

(下转第 150 页)