

doi:10.3969/j.issn.1008-0813.2021.02.004

# 油温对液压阀口空化影响的实验研究

李清华, 刘子晨, 马云飞, 郑直

(兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 空化现象常发生在液压阀口处, 严重影响着液压系统的控制精度, 并伴有强烈的振动和噪声。针对液压阀口空化现象, 运用可视化的实验方法, 研究了油温对空化体积的影响。结果表明, 在液压阀口处, 当进出口压差一定时, 随液压油温度升高, 空化体积逐渐增大。当油液温度在 30℃ 到 60℃ 之间时, 油温与空化体积近似呈线性关系。

**关键词:** 油介质; 空化; 温度; 实验

**中图分类号:** TH137    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1008-0813(2021)02-0015-04

## The Experimental Investigation on the Influence of Oil Temperature on Hydraulic Valve Orifices Cavitation

LI Qing-hua, LIU Zi-chen, MA Yun-fei, ZHENG Zhi

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

**Abstract:** Cavitation phenomenon often occurs in hydraulic valve orifices, which seriously affects the control accuracy of hydraulic system, accompanied by strong vibration and noise. In view cavitation phenomenon of hydraulic valve orifices, visual experimental method was used to analyze the influence of oil temperature on cavitation volume. As a result, at the hydraulic valve orifices, When the pressure difference between the inlet and outlet is constant, the cavitation volume increases with the higher of oil temperature. When the oil temperature is between 30℃ and 60℃, the relationship between oil temperature and cavitation volume is approximately linear.

**Key words:** hydraulic oil; cavitation; temperature; experimental

## 0 前言

液压技术以流体为工作介质, 具有功率密度大、能无级调速、可灵活布置元件、运动平稳、动作迅速等特点, 在工程机械、建筑机械、农业机械、汽车等行业被广泛使用<sup>[1-3]</sup>。在常温常压下, 一般矿物油能溶解大约 6% ~ 12% 的空气<sup>[4]</sup>, 当油液内某处压力低于空气分离压时, 溶解在油液中的空气析出, 最终形成大量气泡并在高压区溃灭的过程称为空化现象<sup>[5]</sup>。液压技术在实际使用过程中, 在节流阀、滑阀等阀口处, 尤其在小开度情况下通常会有空化产生。空化作为一种有害现象, 严重影响着液压系统的控制精度, 并伴有强烈的振动和噪声<sup>[6]</sup>。长期的空化现象会导致元件形成空蚀破坏, 直接影响系统的稳定性, 甚至损坏液压元件。因此, 充分了解油液在液压元件阀口处的流动规律显得

十分重要。

早在 1754 年, 欧拉就观测到了空化现象的发生, 但未能给出完整的解释和定义<sup>[7]</sup>。直到 1895 年, 费鲁德才正式提出了“空化”的概念<sup>[8-9]</sup>。1897 年, 英国人发现蒸汽船的螺旋桨出现金属剥落现象, 严重影响其效率, 第一次出现了空蚀的概念, 自此人们认识到了空化的危害性。

目前针对液压阀口的空化现象进行的实验研究很多。Oshima<sup>[10]</sup>利用半切模型对锥阀气穴流动进行了研究, 得出了锥阀流向(外流、内流式)与气穴、流量和噪声特性的关系。冀宏<sup>[11]</sup>研究了节流阀结构、流态与空化噪声的关系, 研究发现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, 而具有等截面流道的节流槽噪声较低。闵为<sup>[12]</sup>在对低压下锥阀振荡的空化现象研究中发现: 阀芯的振荡型态与流量密切相关。郑直<sup>[13]</sup>对液压阀口空气型空化的周期特性进行了实验研究, 明确了液压阀口空气型空化流动的形态及周期性行为。虽然以上对液压阀口空化现象的研究取得了很大进展, 但是这些实验都没有考虑油温对空化的影响。对于液压系统, 尤其安装在行

**收稿日期:** 2020-03-18

**基金项目:** 国家自然科学基金(51465033)

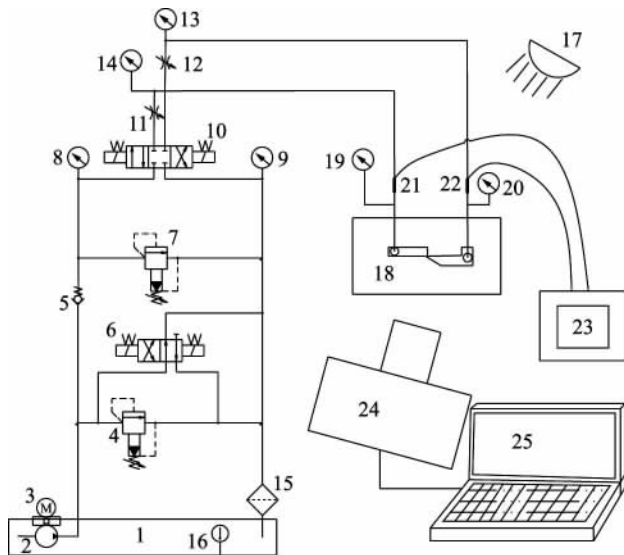
**作者简介:** 李清华(1993-), 男, 黑龙江密山人, 研究生在读, 主要从事计算流体力学、液压元件基础研究。

走机械上时,其工作的环境温度大多在 0℃ ~ 40℃ 范围内,并且工作时由于流动冲击,摩擦、传热、空化等因素影响导致油温常在 30℃ ~ 60℃ 范围内变化。目前研究液体温度对空化的影响多集中在水介质空化上<sup>[14-16]</sup>,但油介质的空化为空气型空化,与水介质的蒸汽型空化在空化机理上存在本质的不同,所以对于油介质,研究其温度对空化的影响十分必要。

本文采用二维可视化实验模型,通过流场可视化的实验方法,研究了液压阀阀口空化时温度对其影响。

## 1 实验系统

图 1 为实验系统示意图,定量泵 2 在电动机 3 带动下提供 15 L/min 的流量,油液可通过单向阀 5、三位四通电磁换向阀 10 和进油节流阀 11 流入实验模型 18,最后油液从实验模型出油口通过回油节流阀 12 流回油箱 1。高速摄像机 24 可对油液在实验模型阀口处的流动过程进行拍摄。实验模型进出口压力分别由 19、20 两个数显压力表显示,量程为 0 ~ 6 MPa,精度为 0.2%。油液温度可通过在进、出口管路上放置的温度传感器测量,量程为 -50℃ ~ 200℃,精度为 0.04%。由于进、出油管路材料为钢,温度介于 0℃ 到 100℃ 之间时,钢的导热系数大于 40 W/(m·k)<sup>[17]</sup>,而液压油的导热系数小于 0.13 W/(m·k),由于两者量级相差 100 倍以上,管路传热能力远远大于油液,所以进、出油



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 8,9,13,14,19,20. 压力表  
11,12. 节流阀 15. 回油过滤器 16. 温度计 17. 光源  
18. 实验模型 21,22. 温度传感器 23. 温度显示设备  
24. 高速摄像机 25. 计算机

图 1 实验系统示意图

管路对传热的影响可以忽略,认为测量的温度值就为油液的温度。

本次实验采用 L-HM46 抗磨液压油,该液压油无机杂质,无水分含量,油液物性参数如表 1 所示。

表 1 油液物性参数

参数	数值
密度 $\rho$	869 kg · m <sup>-3</sup>
运动黏度 $\nu$	4.66 × 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup>
色度	<0.5

实验时,先将回油节流阀 12 调至最大开口,保证出油口直接与油箱相通。逐步调节进油节流阀 11,使实验模型进出口压差保持 2.0 MPa 不变。由于油液冲击、摩擦、空化等作用可导致实验过程中油液温度升高,当油温分别在 30℃、40℃、50℃、60℃ 时,启动高速摄像机对油液进行拍摄。待油温冷却,再分别控制进出口压差为 3.0 MPa、4.0 MPa 重复上述实验操作。

实验模型爆炸图如图 2 所示,共由后盖板、中心框体、上流道有机玻璃板、下流道金属板、压紧盖板和前盖板六部分组成。压紧盖板采用有机玻璃保证阀口空化现象可以被观测。上流道有机玻璃保证了模型可进侧光,使拍摄更清晰。为使实验模型更接近于实际工程阀,其余部分材料均采用 45 号钢。

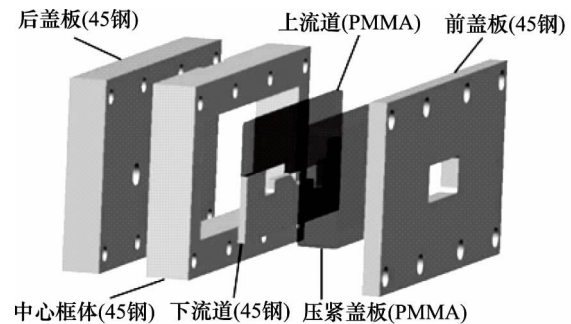


图 2 实验模型爆炸图

实验模型流道结构如图 3 所示。为了减少进出口对实验现象的影响,保持流道流动特性稳定,进油口与阀口间距取  $L_{in} = 5 H$ ,阀口与出油口间距取  $L_{out} = 6 H$ 。实验模型流道的几何结构参数如表 2 所示。

## 2 实验现象与分析

### 2.1 实验现象

如图 4 所示,进出口压差分别为 2.0 MPa、3.0 MPa、4.0 MPa 时,对应油液温度分别为 30℃、40℃、50℃、

60℃的最大空化体积单帧图像。从图中可以看出,各条件下阀口处空穴整体形状大致相同,呈类三角形形态,且空化云团在体积达到最大后会在尾部开始脱落,最终破碎成微小气泡随油液流向下流。在进出口压差相同时,随着油液温度的增加,空化的最大体积逐渐增大,且随油温近似呈线性增加。

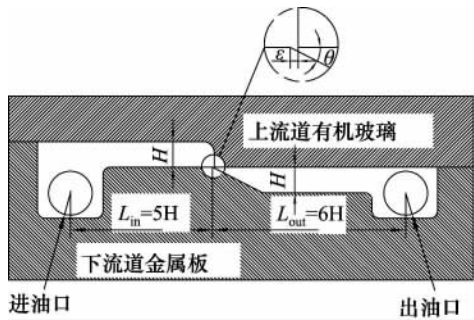


图3 实验模型流道结构

表2 流道几何结构参数

参数	数值
流道高度 $H$	7 mm
进油口与阀口间距 $L_{in}$	35 mm
阀口与出油口间距 $L_{out}$	42 mm
阀口开度 $\epsilon$	0.5 mm
阀口倾角 $\theta$	27°
流道厚度 $D$	4 mm

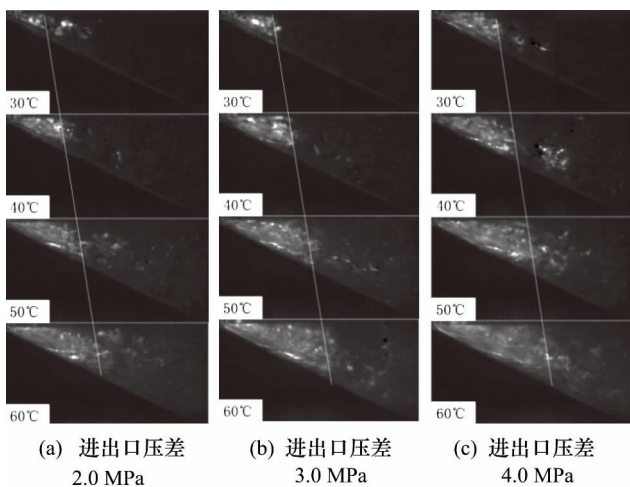


图4 进出口压差相同时,油温分别为30℃、40℃、50℃、60℃时的最大空化体积单帧图像

为了进一步说明温度和空化体积关系,实验对每组拍摄图像取20 ms进行灰度均值时均 $\bar{G}$ 计算,最后将进出口压差为2.0 MPa、3.0 MPa和4.0 MPa时的不同温度下的灰度均值时均 $\bar{G}$ 放在一起比较。结果如图

5所示,图中每个进出口压差条件下灰度均值时均 $\bar{G}$ 都和温度呈较好的线性关系。这与图4中给出的直线变化基本一致,进一步说明在进出口压差一定时,油温与空化体积近似呈线性关系。

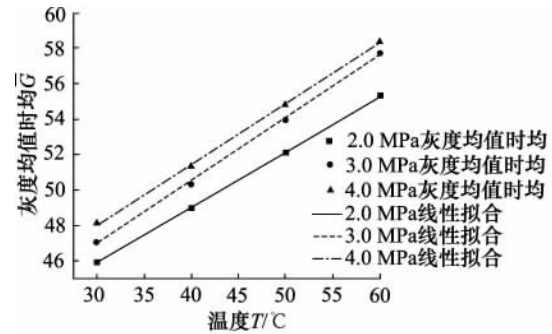


图5 不同油温的灰度均值时均 $\bar{G}$

据文献[15]报道,水介质空化时空化体积会随着液体温度升高而减小,这与本实验的油液空化现象有着明显不同。

### 2.2 分析

本实验观察到以液压油为介质的阀口空化,油温在30℃到60℃之间时,空化区域随着介质温度升高而增大。由于实验油温在30℃到60℃之间远不足以使油液介质本身发生相变,所以油液的空化是空气型空化,空穴内气体来自油液中气体的析出,温度升高后,油液中溶解空气的饱和气压 $p_v$ 增大,能溶解的气体减少,过饱和的气体增多,析出气体的量增加。且气体也会由于温度升高而膨胀,所以空化区域会随着油温升高而增大。实验表明:空化体积随油温近似呈线性变化,初步判断此线性关系是由空气析出起主导作用,具体还需进一步研究。

### 3 结论

本文采用可视化的实验研究方法,在进出口压差分别保持2.0 MPa、3.0 MPa、4.0 MPa的条件下,对液压阀口空化体积与温度的关系进行了研究。由于油介质空化和水介质空化机理不同,导致液压油与水介质在空化时温度对空化体积的影响区别明显。在液压阀口处,当进出口压差一定时,随液压油温度升高,其空化体积逐渐增大,当油液温度在30℃到60℃之间时,油温与空化体积近似呈线性关系。

#### 参考文献

[1] 户艳.我国液压技术发展现状分析及展望[J].液压气动与密封,2019,(7):1-2.

(下转第8页)

- Optimization of Inlet Deflection Angle in Torque Converters  
1. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, v 137, n 3, March 1, 2015.
- [30] Chen, M; Guo, XX; Tan, GF; Pei, XF; Zhang, W. Effects of Blade Lean Angle on a Hydraulic Retarder [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016,5( 8) .
- [31] 刘春宝,刘长锁,马文星,杨化龙. 基于鱼体结构的仿生型液力变矩器叶片环量分配规律 [J]. 北京理工大学学报, 2016,( 9) : 887 - 892 + 904.
- [32] Liu Chumbao; Li Li; Lei Yulong, et al. Drag Reduction and Performance Improvement of Hydraulic Torque Converters with Multiple Biological Characteristics [J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2016,( 1) .
- [33] Liu, CB; Tan, Y; Ma, WX; Yang, HL; Ge, FM; Chen, PZ. Die Compensation Method of Hydraulic Torque Converter Blade Based on Forming Simulation and Spring-back Prediction [J]. Materials Research Innovations, 2015,19: 1144 - 1149.
- [34] 马文星,王文博,刘春宝. 新型轴流导叶可调液力变矩器设计与分析 [J]. 液压与气动, 2015,( 12) : 1 - 6.
- [35] 刘树成. 车用柴油机与液力变矩器动态匹配技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [36] 陈凯,吴光强. 基于遗传算法的液力变矩器与发动机匹配的多目标优化 [J]. 汽车工程, 2014,( 05) : 532 - 536.
- [37] 马文星,葛林杉,刘春宝,徐东,李雪松. 基于动态充油过程联合仿真的液力变矩器控制系统优化 [J]. 北京理工大学学报, 2016,( 01) : 1 - 7.
- [38] 闫清东,刘博深,魏巍. 基于动网格的冲焊型液力变矩器流固耦合分析 [J]. 华中科技大学学报( 自然科学版), 2015,( 12) : 37 - 41.
- [39] 闫清东,刘博深,魏巍. 液力变矩器流体-固体耦合压力脉动分析 [J]. 兵工学报, 2016,( 04) : 577 - 583.
- [40] 吴光强,黄建勋,王立军. 流固耦合作用对液力变矩器内流场和叶片强度的影响 [J]. 汽车工程, 2012,( 07) : 643 - 646 + 652.
- [41] 谭越,马文星,卢秀泉. 基于流固耦合的冲焊型液力变矩器焊接强度分析 [J]. 吉林大学学报( 工学版), 2013,( 04) : 928 - 932.
- [42] 朱喜林,刘春宝,马文星,席智星. 冲焊型与铸造型液力变矩器性能对比分析 [J]. 北京工业大学学报, 2012,( 03) : 335 - 339.
- [43] 谭越,马文星,刘春宝. 冲焊型液力变矩器叶片成形的精密控制 [J]. 吉林大学学报( 工学版), 2013,( S1) : 530 - 534.
- [44] 王安麟,刘伟国,龙广成. 基于液力变矩器流固耦合的叶片厚度设计方法 [J]. 同济大学学报( 自然科学版), 2015,( 04) : 599 - 604.
- [45] “10000 个科学难题”制造科学编委会. 10000 个科学难题( 制造科学卷) [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [46] 中国液压气动密封件工业协会. 流体传动与控制技术路线图 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2012.
- [47] 中国液压气动密封件工业协会. 液力变矩器行业“十三五”发展规划 [Z]. 北京: 中国液压气动密封件工业协会秘书处, 2016.

(上接第 17 页)

- [2] 叶俊峰,朱安宁,齐芳,等. 液压系统热平衡理论分析 [J]. 液压气动与密封, 2019,( 11) : 20 - 25.
- [3] 林言丕,赵鹏坤,李清华,等. 液压滑阀 V 型节流槽内部空化流动仿真分析 [J]. 液压气动与密封, 2019,( 12) : 19 - 22.
- [4] 李流远. 油液含气量对液压系统的影响 [J]. 液压与气动, 2001,( 1) : 27 - 28.
- [5] 潘森森. “空化”条. 见: 中国大百科全书( 力学卷) [M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1985: 273 - 274.
- [6] 冀宏. 液力阀芯节流槽气穴噪声特性的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [7] 陆亮. 液压节流阀中的空化流动与噪声 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [8] 杜学文. 液力阀口空化机理及对系统的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [9] J I Thornycroft, S W Barnaby. Torpedo-Boat Destroyers [J]. Proceeding Institute Civil Engineering, 1895,( 122) : 51 - 69.
- [10] Oshima S, Leino T, Linjama M, Koskinen, K T, Vilenius, M J. Effect of Cavitation in Water Hydraulic Poppet Valves [J]. Fluid Power, 2001,2( 3) : 5 - 13.
- [11] 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.
- [12] 闵为,王东,郑直,等. 低压下锥阀振荡空化的可视化试验研究 [J]. 机械工程学报, 2018,54( 20) : 139 - 144.
- [13] 郑直,赵鹏坤,闵为,等. 液力阀口空气型空化周期特性的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2019,53( 10) : 72 - 78, 150.
- [14] Cervone A, Bramanti C, Rapposelli E, et al. Thermal Cavitation Experiments on a NACA0015 Hydrofoil [J]. Journal of Fluids Engineering, 2006,128( 2) : 326 - 331.
- [15] 时素果,王国玉,胡常莉,等. 不同温度水体空化水动力脉动特性的试验研究 [J]. 机械工程学报, 2014,50( 8) : 174 - 181.
- [16] 项乐,谭永华,陈晖,等. 水温对空化流动影响的数值研究 [J]. 推进技术, 2020,( 6) .
- [17] 蒙玉勇,王建军,周俐,等. 不同钢种导热系数随温度变化规律的研究 [J]. 钢铁钒钛, 2013,34( 3) : 97 - 100, 106.