

空化与非空化下高速开关阀阀芯液压力特性研究

陈 誉^{1,2*} 赵 琛¹ 何玉文¹ 翟富刚^{1,2} 孔祥东^{1,2}

1. 南京工程学院机械工程学院, 南京, 211167

2. 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛, 066004

摘要: 针对不同参数对高速开关阀液压力的影响, 采用计算流体动力学(CFD)技术对阀内流场进行瞬态数值模拟。在非空化和空化工况下, 分别探究压差、背压、温度对阀芯液压力的影响, 揭示不同开度下的空化流场特性和阀芯液压力的演变; 选取空化较严重的工况, 探究空化波动和液压力振荡之间的关联。结果表明: 随着开度的增加, 阀芯所受液压力呈减小趋势; 随着压差的不断增大, 非空化工况阀芯液压力减幅远大于空化工况, 在6 MPa与10 MPa压差下尤为明显; 背压的增大一定程度上抑制了空化的发生, 使得空化时的液压力呈近似线性减小, 但几乎不影响非空化下的液压力大小; 温度升高使小开度下更易发生空化, 且空化时液压力演变更加平滑。另外, 阀口空化产生的气泡以非对称“活塞”特性型式依次排出阀体, 导致阀内气泡体积以1355 Hz主频周期性振荡, 进一步诱导阀芯头部及整个阀体液压力以相同主频波动。

关键词: 高速开关阀; 空化; 液压力; 数值模拟

中图分类号: TH173

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.02.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Hydraulic Pressure Characteristics of High Speed Switching Valve under Cavitation and Non Cavitation Conditions

CHEN Yu^{1,2*} ZHAO Chen¹ HE Yuwen¹ ZHAI Fugang^{1,2} KONG Xiangdong^{1,2}

1. Department of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, 211167

2. Department of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

Abstract: Aiming at the influences of different parameters on the hydraulic pressure of high-speed switching valves, the transient numerical simulation of the flow field in the valve was carried out by using computational fluid dynamics(CFD) technology. Under non-cavitation and cavitation conditions, the effects of pressure difference, back pressure and temperature on the hydraulic pressure of the valve cores were investigated respectively, and the cavitation flow field characteristics and the evolution of the hydraulic pressure of the valve cores under different opening degrees were revealed. The working conditions with severe cavitation were selected to explore the correlation between cavitation fluctuation and hydraulic pressure oscillation. The results show that with the increase of opening degree, the hydraulic pressure on the spool decreases. With the increase of pressure difference, the pressure drops of valve cores under non-cavitation conditions are much larger than that under cavitation conditions, especially under 6 MPa and 10 MPa pressure difference. The increase of back pressure restrains the occurrence of cavitation to a certain extent, which makes the liquid pressure during cavitation decrease approximately linearly, but almost does not affect the liquid pressure under non-cavitation. The increase of temperature makes cavitation more likely to occur under small opening, and the evolution of liquid pressure under cavitation is smoother. On the other hand, the bubbles generated by the cavitation of the valve ports are discharged from the valve body in an asymmetric ‘piston’ characteristic, which causes the bubble volume in the valve to oscillate periodically at the main frequency of 1355 Hz, and further induces the head of the valve core and the overall hydraulic pressure to fluctuate at the same main frequency.

Key words: high-speed switching valve; cavitation; hydraulic pressure; numerical simulation

收稿日期: 2025-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(52275068); 河北省高层次人才项目(B2022003022); 南京工程学院高层次人才引进人才科研启动基金(YKJ202131)

0 引言

在液压控制向智能化、高精度、节能化方向发展的过程中, 其核心元件高速开关阀凭借模块化设计优势、优越的抗污染性能和显著的成本效益,

已成为机电液一体化液压系统升级的关键。高速开关阀的启闭动态过程会形成瞬态高速射流,较大的速度梯度将诱导空化的发生。阀内空化使阀芯受力更加不均、动力学非线性增强,同时引起结构振动、机械部件表面空蚀,最终导致控制系统精度下降甚至动态响应失效。

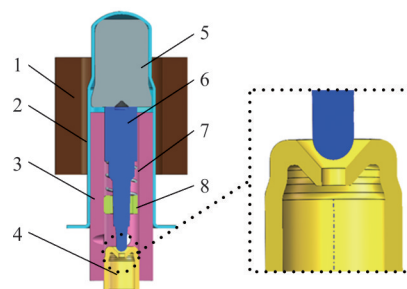
阀内空化受到国内外学者的广泛关注。王鹏飞^[1]通过数值模拟探究锥阀不同结构参数对阀口空化的影响,发现阀座倒角与阀芯锥角越小、阀座倒角长度越短、阀口开度越小,锥阀内空化越弱;阀芯形状为圆柱形、凸台形、环形槽形对阀内空化强度有依次增强作用。XU等^[2]基于大涡模拟方法研究了非稳态空化流动中机械能的传递规律,揭示了空化对不同压比条件下能量损失的影响机制。BERNAD等^[3]针对具有直角阀座的锥阀二维轴对称模型和三维实体模型分别进行单相和气液两相数值模拟,借助内流场流线和压力分布获得了阀口附近旋涡与气穴的位置。LIU等^[4]通过仿真手段探究了动边界对阀内空化的影响,研究表明:阀内空化过程可分为剧烈和相对平缓两个阶段,系统压力和开度的增大会加剧空化发生,导致空化位置向密封环面处移动。陈震^[5]针对阀芯转速过高引起的阀口气穴问题,在不同运动和结构参数下开展阀口空化数值模拟和量化分析,结果表明:空化范围和气相体积的减小速度随出口压力的增大而增大;增大阀口流道的倾斜角度可有效抑制气穴的发生。李树勋等^[6]基于Schnerer-Sauer空化模型和标准 $k-\epsilon$ 湍流模型对活塞式流量调节阀内部流场进行数值仿真,发现阀内节流处容易发生小范围空化。李森林^[7]结合多相流数值模拟技术和理论分析,探究锥阀阀口在节流、溢流工况下的瞬态空化流动,发现空化在发展阶段会促进阀口流速提高,空泡溃灭将降低阀口流速。LU^[8]基于流束收缩理论定义了锥阀阀口固定型空化漩涡与离散型空化漩涡,提出用阀口开度、密封长度和阀芯半锥角定义阀口等效长径比,通过实验与数值计算揭示了阀口空化形态随等效长径比的演变规律及其对流量饱和的影响机制,为锥阀结构优化提供了理论依据。

上述研究从多角度揭示了阀口的空化流场特性,主要集中在阀口空化演变方面,而空化对阀芯液压力的定量影响的研究鲜有报道,且多通过压力脉动揭示空化体积波动,很少直接研究阀芯液压力的动态特性。本文重点探讨空化流场中高速开关阀的阀芯液压力特性,通过数值模拟技术研

究不同边界条件、不同工作温度对阀芯液压力的影响,揭示空化流场和阀芯液压力随开度的演变;并选取空化严重的工况,有针对性地研究阀口处空化波动与阀芯液压力的干涉关联。

1 高速开关阀模型

本文高速开关阀为二位二通的电磁阀,其三维结构如图1所示。图2所示为液压油在高速开关阀内的流动,油液从阀下部进入阀腔,通过三个互相夹角 120° 的出口排出。为研究方便,与Y轴平行的出口标定为出口1,其左侧为出口2,右侧为出口3,图中蓝色面为主流区三个出口的监测面;将阀芯头部受阀口射流影响较大的区域面单独标记,根据其几何形状不同,由下而上分别为阀芯头部qt、阀体t1和t2段。



1. 线圈 2. 隔磁管 3. 阀体 4. 阀座 5. 动铁 6. 阀芯
7. 弹簧 8. 挡圈

图1 高速开关阀结构与阀口局部放大图

Fig.1 High-speed switching valve structure and valve port local amplification diagram

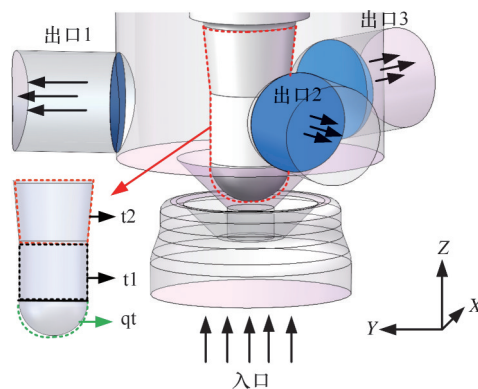


图2 开关阀阀内油液流动示意图

Fig.2 Flow diagram of oil in switching valve

本文探讨开关阀阀口位置的流体空化及波动特性,因此,对阀口网格进行了细化处理,网格划分如图3所示。

前期研究已对该模型的网格无关性作了相关验证^[9],由此综合考虑数值计算精度和仿真效率,本文流体域网格总数为 1.32×10^6 ,节点数为 1.02×10^7 。

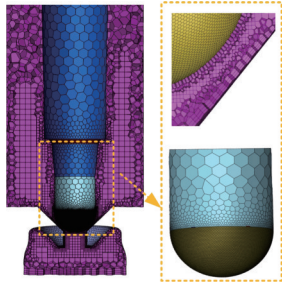


图3 开关阀网格划分图

Fig.3 Grid division diagram of switch valve

2 数值模型

2.1 湍流及空化模型

标准 $k-\epsilon$ 模型 (k 为湍动能, ϵ 为耗散率) 适用于完全湍流的流动过程仿真, 通过对壁面采用标准壁面函数处理, 能够为高雷诺数流动边界下的流体提供精确合理的预测, 由此选择标准 $k-\epsilon$ 模型是合适的。

阀口压差较大时空化易发生, 因而综合选用标准 $k-\epsilon$ 模型和 Zwart-Gerber-Belamri (ZGB) 空化模型。ZGB 模型是忽略表面张力、黏性等 Rayleigh-Plesset 方程, 采用气泡密度及气泡半径来描述气体体积分数 α_v , 并结合传质方程推导出来的气液两相的相变过程^[10]。该模型基于局部压力 p 与饱和蒸汽压 p_v 的大小关系, 将空化分为蒸汽生成过程和蒸汽凝结过程。ZGB 模型方程为

$$\left. \begin{aligned} R_c &= F_{\text{vcp}} \frac{3\alpha_{\text{mic}}(1-\alpha_v)\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2(p_v-p)}{3\rho_l}} & p \leq p_v \\ R_c &= F_{\text{cond}} \frac{3\alpha_v\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2(p-p_v)}{3\rho_l}} & p > p_v \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: R_c 为蒸汽生成率; R_c 为蒸汽凝结率; F_{vcp} 为蒸发校正系数; F_{cond} 为凝结校正系数; α_{mic} 为成核位置体积分数; α_v 为气相体积分数; ρ_v 为气相密度; ρ_l 为液相密度; R_B 为空泡半径。

选择混合多相流模型下的 ZGB 空化模型进行传质和相间作用仿真时, 空化气泡被假设具有相同大小, 即式 (1) 中的空泡半径统一设置为 0.001 mm。其他主要参数设置见表 1。

表 1 仿真模型参数

Tab.1 Simulation model parameters

| | |
|--------------------------------------|-------------------|
| 液压油密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^3$) | 850 |
| 液压油空化压力/Pa | 400 |
| 计算时间步长/s | 1×10^{-5} |

2.2 仿真边界条件

首先探究不同压差对阀芯液压力的影响, 设置了六组边界条件进行仿真, 具体进出口压力及压差值如图 4 所示; 同时, 在第六组中保持压差 10 MPa 不变, 同步改变进出口压力, 探究相同压差下背压对阀芯液压力的影响。

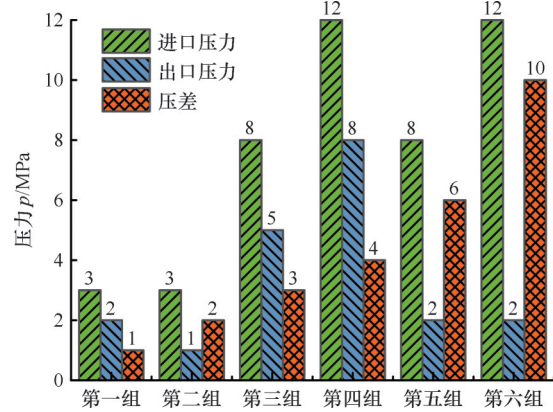


图 4 进出口压力及压差边界条件

Fig.4 Boundary condition of inlet, outlet pressure and pressure difference

依据高速开关阀实际工作要求, 选用 DOT4 型号的液压油作为仿真流体介质。液压油的温度动力黏度曲线见图 5, 20~80 °C 的动力黏度变化幅度较小, 由此在不探究温度对液压力的影响时液压油的动力黏度取 20 °C 工况的对应值。

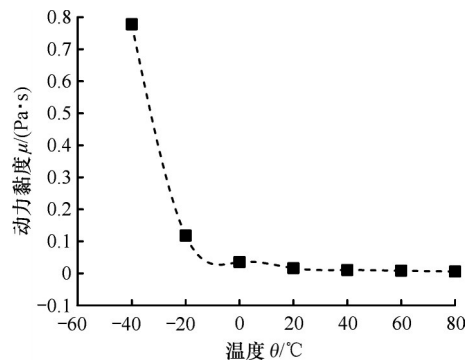


图 5 DOT4 液压油的温度动力黏度曲线

Fig.5 Temperature dynamic viscosity curve of DOT4 hydraulic oil

3 仿真结果与分析

非空化工况是液压系统及元件运行的基准状态。当液压阀腔内发生空化时, 其关键特性参数如流场压力、阀芯液压力会偏离非空化基准。为深入探究空化对阀芯液压力的影响机制, 首要前提是准确界定与量化空化与非空化状态下阀芯液压力特性的本质差异。因此, 研究非空化工况下的液压力特性, 并以此作为对照基准, 与空化发生时的阀芯液压力进行比较分析, 多方面揭示空化对阀芯液压力的影响。

本文讨论的液压力为阀芯表面受到的轴向合力, 正方向设为流体流入阀体的方向, 即图 2 中的 Z 向。

3.1 仿真结果验证

依托机械工业智能流体传动与控制重点实验

室的液压元件与系统高精度建模与仿真平台,通过粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 设备开展研究对象内流场实测。所搭建的PIV试验测试台如图6所示,包括Vlite-135高能量双腔激光发射器、高速摄像机、高压电源、图像处理服务器、测试回路等。系统最小跨帧时间达 $0.15\ \mu\text{s}$,测速范围 $0\sim 300\ \text{m/s}$,示踪粒子最大直径 $20\ \mu\text{m}$,速度测量误差小于1%。

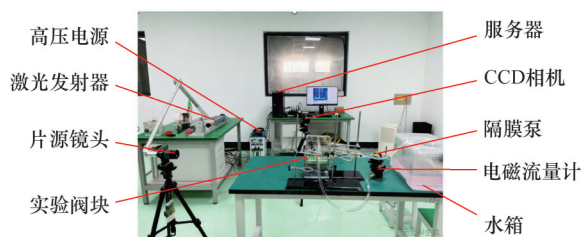


图6 PIV试验测试台
Fig.6 PIV test rig and system

选用水为实验介质实现更清晰的测量和观察,同时与阀内水体流场的非空化仿真结果进行对比,两种方法在不同开度、不同压差组合下得到的轴面速度云图和流线见图7。试验观测到的高速射流集中在阀口处,与仿真预测的结果一致。当开度和压差同时减小时,两种方法得到的阀口射流速度均降低、射流范围缩小。由两种方法得到的速度流线可知,阀口上方出口对侧均出现了明显的涡旋。因此,测试结果与仿真结果在流动特征量分布、量值上对应良好,验证了仿真方法的合理性和结果的准确性。

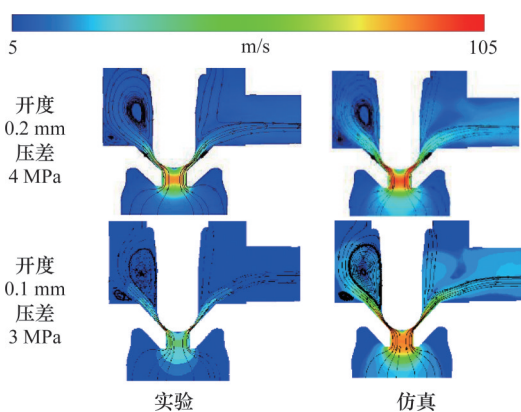


图7 实验与仿真流场对比

Fig.7 Flow field comparison between experiment and simulation

3.2 不同压差下液压力演变

图5所示DOT4液压油的动力黏度在温度超过 $20\ ^\circ\text{C}$ 后基本趋于稳定,此处设定液压油在该温度下工作,选取图4所示边界条件,探究不同压差下阀芯液压力随开度的演变规律。

3.2.1 非空化工况

不考虑空化发生,不同压差下,液压力在小开度 $0.01\sim 0.04\ \text{mm}$ 范围的变化如图8所示。图8中,温度相同时,阀口压差越大,则随着开度的增加,阀芯液压力减幅越大。在小开度时,压差越大,阀芯所受的液压力也越大。但随着开度的增大,节流作用影响逐渐增强,导致液压力减小速度加快。

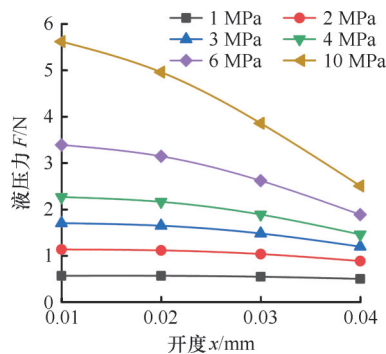


图8 小开度压差与液压力曲线

Fig.8 Pressure difference and hydraulic force curve at small openings

液压力在大开度 $0.04\sim 0.22\ \text{mm}$ 范围的变化如图9所示。随着开度的增大,阀芯液压力呈现先减小再增大的变化趋势。开度小于 $0.14\ \text{mm}$ 时,阀口位置起节流主导作用,随着阀口压差的增大,液压力减小速率加快。开度为 $0.06\sim 0.12\ \text{mm}$ 时,液压力曲线与液压力为0的水平线相交,且压差越大,曲线与水平零线相交越早,说明阀芯对阀口的控制能力随着压差的增大而减弱。

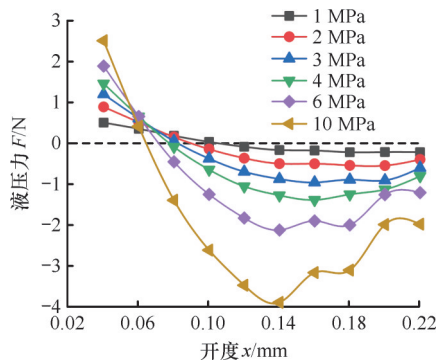


图9 大开度压差与液压力曲线

Fig.9 Pressure difference and hydraulic force curve at large openings

开度大于 $0.14\ \text{mm}$ 时,液压力出现增大波动。将阀芯头部qt区域所受液压力单独提取,在 $6\ \text{MPa}$ 压差下其随开度的变化如图10所示。随着开度的增大,节流作用位置由阀口转移到阀芯上游的阀座节流孔^[11],此时qt区域周围流速下降,压力增大,因而所受液压力增大;同时由于阀芯头部绕流旋涡的周期动态特性增强,故液压力呈现

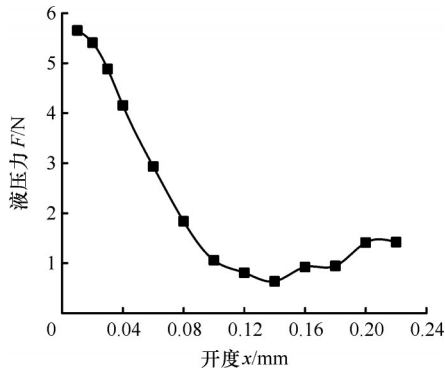


图 10 压差 6 MPa 下 qt 区域液压力

Fig.10 Hydraulic force of qt part under the pressure difference of 6 MPa

波动增大。

3.2.2 空化工况

考虑到空化发生,为了较好地观察空化现象,选取阀口压差为 6 MPa、10 MPa 的第五组和第六组工况,探究空化下阀芯液压力的变化。小开度下的中轴面流体空化体积分布如图 11 所示。

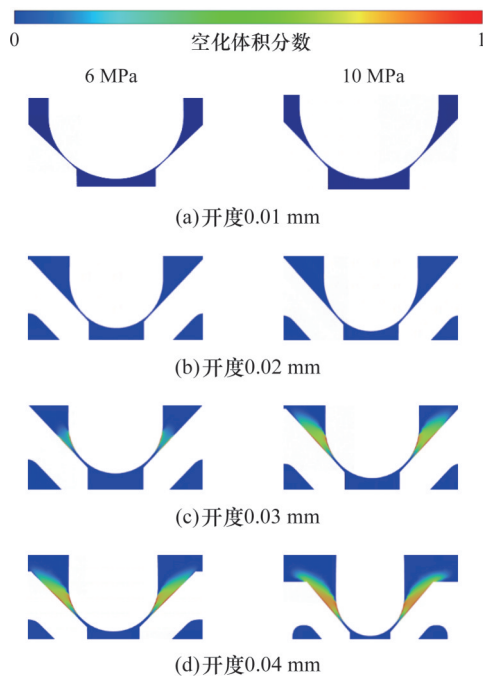


图 11 气相体积分布

Fig.11 Distribution of gas phase

节流口处过流断面变窄,流速加快,低压的出现致使空化发生。图 11 中阀口开度为 0.03 mm 时开始出现空化现象。此时,气泡聚集在阀芯与阀座间隙处,范围较小。随着开度的增大,低压区进一步扩大,空化区域随之扩大^[12]。小开度空化与非空化下的阀芯液压力对比如图 12 所示。

在小开度范围,空化对阀芯液压力的影响与非空化工况的差异不大。此时空化刚开始显现,阀芯液压力主要受节流作用的影响,空化的影响微弱。

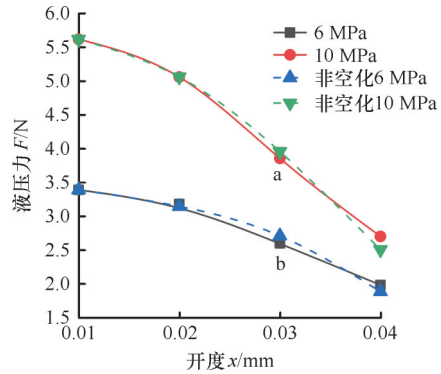


图 12 小开度下空化与非空化液压力

Fig.12 Cavitation and non-cavitation hydraulic force at small openings

如图 12 中的 a、b 点所示,开度为 0.03 mm 时,非空化工况液压力高于空化工况。由于空化时阀口处生成气泡,对流体产生一定的阻碍,从而减弱了流体对阀芯的压力作用,阀芯所受液压力减小。

压差为 6 MPa 和 10 MPa 时,大开度下阀芯液压力变化如图 13 所示。随着开度的增大,流经阀芯与阀座的流体速度加快,导致阀芯、阀座附近的压力进一步减小,空化现象加剧,阀口处气泡增加,从而改变了阀芯所受的液压力分布,此时空化成为影响液压力的主要因素。气泡生成、生长成团对阀芯头部的顶托作用及气团湮灭对阀芯的冲击作用,均增大了阀芯的液压力,由此空化工况下阀芯液压力高于非空化工况。随着开度的增大,空化液压力逐渐减小,较非空化工况,液压力减幅变缓且变化更加平滑。由于空化增大了阀芯液压力,该工况下液压力曲线与 0 压力线相交点后移,导致阀门关闭滞后。随着空化程度的加剧,如果阀芯长期处于此工况,会影响液压控制系统的准确性与稳定性。

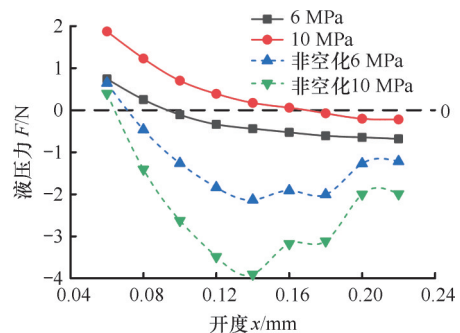


图 13 大开度下空化与非空化液压力

Fig.13 Cavitation and non-cavitation hydraulic force at large openings

3.3 不同背压下的液压力演变

由 3.2 节可知,开关阀进出口压差为 10 MPa 时阀口空化较为严重,为探究背压 p_2 对阀芯液压力的影响,更深入观察不同背压下空化的演变,选

取该压差边界、同步改变进出口压力进行研究。开度设为0.1 mm,背压以0.2 MPa为间隔从0至2 MPa变化。

阀芯所受液压力与背压密切相关^[13],空化与非空化下液压力、空化体积等参数随背压的变化如图14所示。可知,由于进出口压差不变,非空化下阀芯液压力在背压改变时几乎保持恒定。空化工况下,液压力随背压的增大呈近似线性减小。由空化液压力曲线斜率线可知,背压增大前期对空化影响较大,但超过1 MPa后影响微弱。

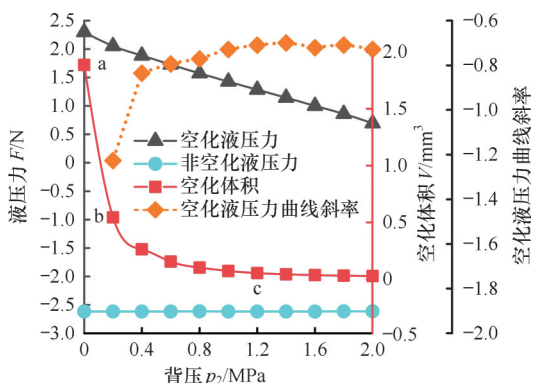


图14 空化体积和液压力随背压变化

Fig.14 Cavitation volume and hydraulic force against back pressure

通常采用气相体积分数作为衡量空化程度及空化区域大小的重要依据^[14],图15为压差10 MPa、开度0.1 mm、不同背压时阀中轴面上空化体积云图。在相同压差条件下,不同出口压力会导致不同程度的空化,随着背压的增大,空化逐渐减弱。空化的产生依赖于阀口流体的局部低压区,而较大的背压导致出口上游压力增大,局部低压区范围缩小,进而抑制空化的发生^[15]。但背压过大时,空化现象不会完全消失而是趋于稳定,如图14中,背压在1.2~2.0 MPa范围,空化体积的曲线波动微弱,但液压力持续减小。空化体积的波动小,气团湮灭对阀芯的冲击波动也随之减弱,空化对阀芯液压力的影响趋于稳定,此时,近似线性减小的空化液压力主要受线性增加的出口背压的影响。

综上所述,非空化下,进出口压差不变,阀芯

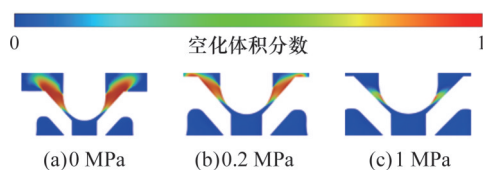


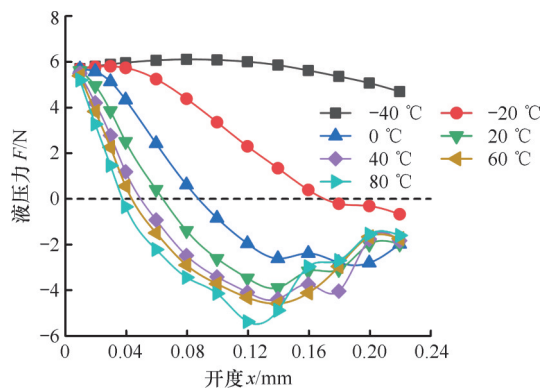
图15 不同背压下空化云图

Fig.15 Cavitation contour under different back pressure

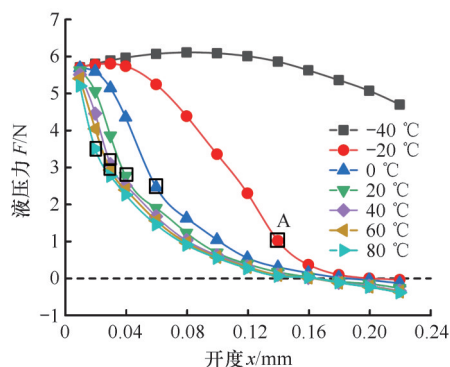
所受液压力不随背压的增大而变化。空化发生时,背压的增大对空化有抑制作用;背压过大时,空化对液压力的影响趋于稳定,此时背压增大是阀芯液压力线性减小的主导因素。

3.4 不同温度下液压力演变

选取压差为10 MPa的第六组工况,温度以20 °C为间隔,从-40~80 °C变化,探究不同温度下阀芯液压力随开度的演变,空化与非空化两种情况的液压力如图16所示。



(a)非空化工况



(b)空化工况

图16 不同温度下液压力随开度变化

Fig.16 Variation of hydraulic force with opening at different temperatures

无论空化还是非空化,低温对液压力的影响较大,高温的影响微弱。温度升高会导致流体动力黏度显著下降,改变流体流动特性,从而引起阀芯所受液压力的变化^[16]。图16中,当温度由-40 °C升至-20 °C时,同开度下的液压力变化尤为明显,这是由于低温区间流体处于高黏度状态,温度微小变化即可引起动力黏度的剧烈波动,进而导致阀芯液压力产生显著变化。

在非空化下,流体流经阀口时对阀芯头部产生的液压力主要由两部分组成:一是流体对阀芯头部的直接冲击力,二是液压油在流经阀口时产生的切向力在轴向的分量。随着液压油动力黏度的降低,切向力的轴向分力随之减小。在0~

80 °C区间,流体的动力黏度变化较小,则液压力变化幅度减小。在20 °C及以上温度的大开度工况,温度和开度的影响使液压力呈现增大趋势,这表明主导节流作用的区域从阀口转移到阀座节流孔处。开度达0.14 mm后,阀口流场结构愈加复杂,导致液压力曲线呈非规律性振荡。

温度上升导致流体的流动性提高,使得阀体内流场分布发生改变,出现空化现象,如图17所示。

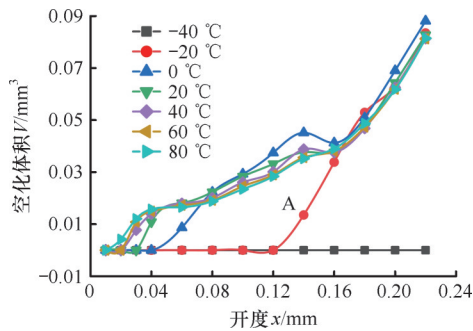


图17 不同温度下空化体积随开度变化

Fig.17 Variation of cavitation volume with opening at different temperatures

空化工况下,温度从-40 °C(未空化)升至-20 °C时,阀口空化初生开度提前至0.14 mm(对应图17中A点),该开度也成为液压力变化曲线的曲率拐点(对应图16中A点)。在拐点后,由于空化的影响,液压力减小速率较非空化工况降低了24.05%。随着温度的升高,空化初生开度不断提前。随着开度的增加,空化体积持续增大,开度达到0.16 mm后不同温度空化体积趋于一致,并继续增大,因而图16b中液压力在开度达0.16 mm后趋于稳定。

综上所述,温升导致流体动力黏度降低,使流体在阀芯与阀座之间的流动性显著提高,此处流体压力减小^[17]。非空化工况下,阀芯头部所受流体的直接冲击液压力保持不变,所受的切向力轴向分量会随温度的上升而减小。空化工况下,随温度的上升,空化发生的开度提前,且空化程度愈严重。空化过程中,气泡顶托和气团湮灭冲击作用,增大了阀芯液压力,使其减幅和速度均小于非空化工况,随着开度的增加,液压力趋于稳定。

4 空化波动下液压力动态特性

发生空化时空泡生成、发展、溃灭三个阶段均会引起空化体积波动^[18],进一步诱导液压力的变化。尤其在空泡溃灭阶段,其产生的高压射流冲击阀芯,导致液压力振荡,影响开关阀动态调控性能。因此,根据前文研究选择空化较严重的工况

探究液压力的波动特性,工况条件如下:开度0.2 mm,温度20 °C,进出口压差10 MPa、背压0 MPa。

图18为阀内空化体积分数云图,由下而上qt段除头部面均受到空化的影响,t1段下部受到空化的影响,而t2段受几乎不受空化影响,故对阀芯qt与t1段进行研究。

开关阀出口流道内空化气泡的演变对阀腔流场的影响较小,总空化体积的监测难以捕捉阀腔流场演变的细节特征,故选取阀体主流区出口截面空化体积分数作为监测对象。截面位置如图2中蓝色面所示。

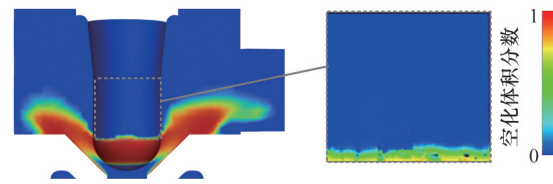


图18 阀内空化体积分数云图

Fig.18 Contour of cavitation volume fraction in valve

图19所示为qt与t1段所受液压力和三个出口监测面上空化总体积分数的频谱。阀芯两个部分液压力与总空化体积分数主频皆为1355 Hz,阀芯头部qt与阀体t1段液压力波动与空化波动相关。

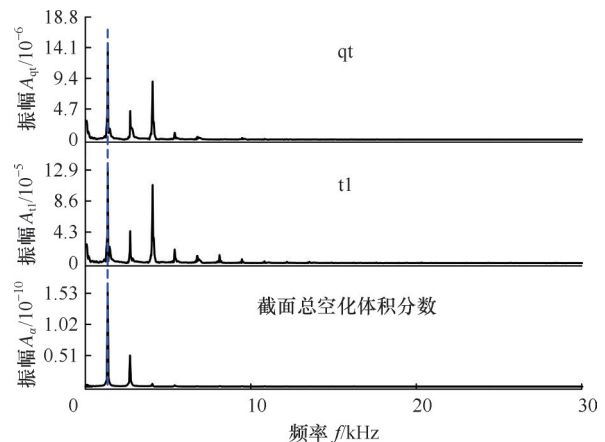
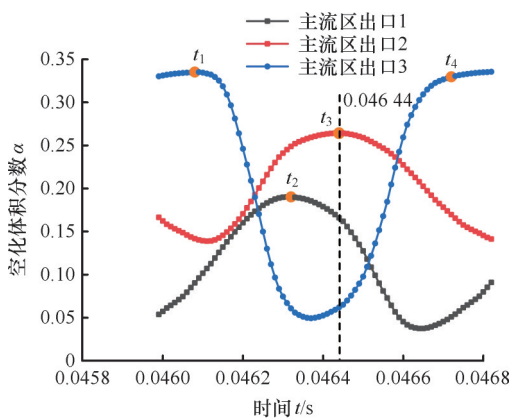


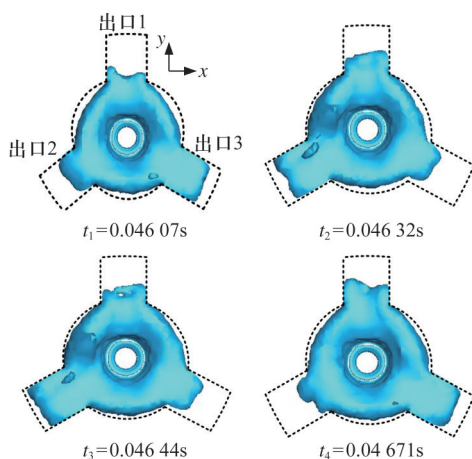
图19 qt和t1液压力与监测面总空化体积分数频谱

Fig.19 Frequency spectrum of hydraulic force and total cavitation volume fraction on monitoring surfaces

主流区每个出口截面上空化体积分数的变化如图20a所示,三个出口空化体积均呈周期性波动。在一个周期内,出口3截面空化体积分数波动幅值较大,而出口1和出口2处的波动相对较小。出口3截面空化体积分数处于波谷时,出口1和出口2截面的空化体积分数依次到达波峰,且峰值位置接近。图20a中标记的 t_1 至 t_4 时刻点对应的阀腔内空化区域如图20b所示,可见该空化区在三个出口段内呈非对称“活塞”特性波动,导致开关阀在运行过程中,阀芯qt与t1段受到空化



(a) 监测面空化体积分数时域波动



(b) 空化体积变化

图20 监测面空化体积分数曲线与空化体积变化
Fig.20 Cavitation volume fraction on monitoring surfaces and cavitation volume variation

体积周期性波动的影响,液压力呈现周期性变化。

4.1 阀芯 t1 段液压力波动

阀芯 t1 段所受液压力、表面空化体积分数及主流区三个出口总空化体积分数随时间的波动如图 21 所示。t=0.046 18 s 时,出口截面空化总体积分数达到极大值 0.5966,t1 段表面空化体积分数减小至极小值 0.041 06,阀腔内空化体积达到极小值。由于 t1 段不仅受空化影响,还受到上层

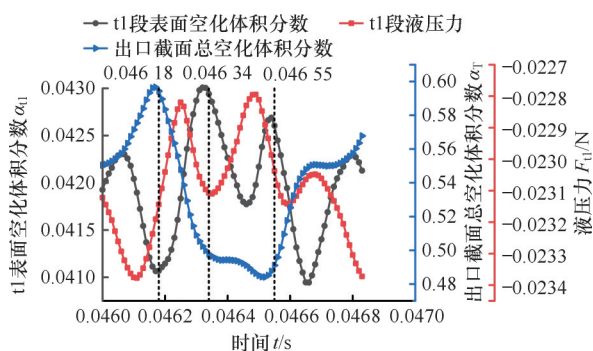


图 21 t1 段液压力与空化体积分数变化

Fig.21 Variation of t1 hydraulic force and cavitation volume fraction

涡旋的影响,且涡旋在阀口处变化要比空化涡超前,故 t1 段液压力不与 t1 段表面空化的波动同步,有一定相位的超前。

在 0.046 34~0.046 55 s 出口截面空化总体积分数处于稳定波动阶段,该时段液压力波动源于开关阀三个出口间的空化气泡迁移:当出口 3 截面空化体积分数从最大值 0.3345 开始减小时,原本从出口 3 排出的气泡通过阀腔向出口 1、2 转移,由此出口截面空化总体积变化较小。但由图 20 可得,在 0.046 44s 后,出口 2 截面空化体积达到峰值,出口 3 在波谷范围内变化平缓,而出口 1 减幅较大,致使三个出口截面总空化体积分数减小,因而 t1 表面空化体积分数达到波谷,使得其所受液压力出现局部极大值。

4.2 阀芯 qt 段液压力波动

qt 段位于阀芯头部,是空化主要发生位置,其液压力与空化体积变化如图 22 所示。出口截面总空化体积增大,对应着 qt 段所受液压力的减小,两者之间存在 180° 相位差。而 qt 段表面空化

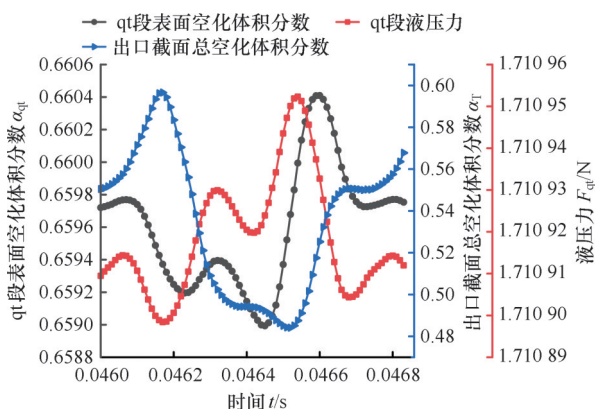


图 22 qt 段液压力与空化体积分数变化

Fig.22 Variation of qt hydraulic force and cavitation volume fraction

体积分数的变化与液压力同步,由此 qt 段的液压力主要受其周围空化气泡的影响,阀腔内空化区“活塞”式交变使液压力呈现周期性波动。

为探究阀口附近不同位置的空化程度对 qt 段液压力的影响,在阀芯头部空化初生处选取一水平面,并在面上均布 6 个监测点,如图 23 所示。其中,点 1、2、3 分别对应阀的三个出口,点 1'、2'、3' 为各自出口对面的阀腔壁面侧。

出口侧三个点空化体积分数时域波动和频域分布如图 24 所示,出口 1 侧监测点的空化体积分数最大,但波动振幅最小,为出口 2 的 71.54%、出口 3 的 69.81%。这是因为出口 1 侧空化程度严重,形成持续性的气团堆积,导致该区域空化体积波动较小。由于出口 2、3 侧空化体积相对较小、波

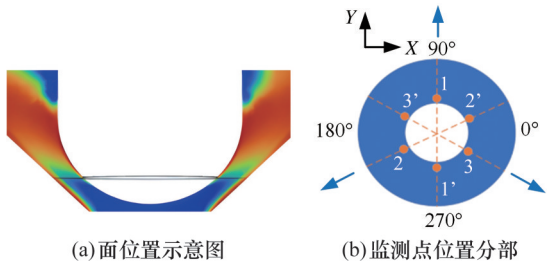
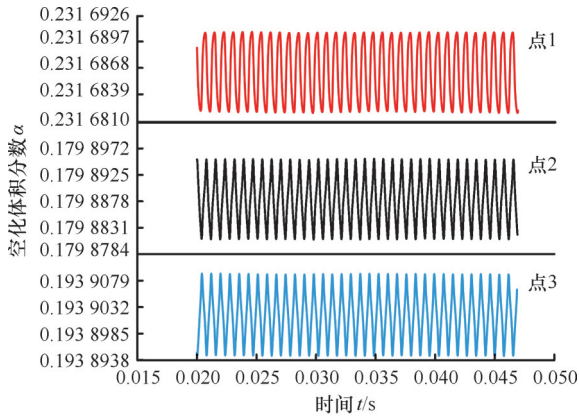
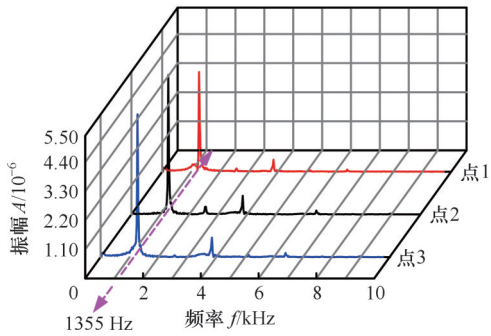


图 23 点位置示意图

Fig.23 point position diagram



(a) 出口侧空化体积分数时域波动



(b) 出口侧空化体积分数频域特征

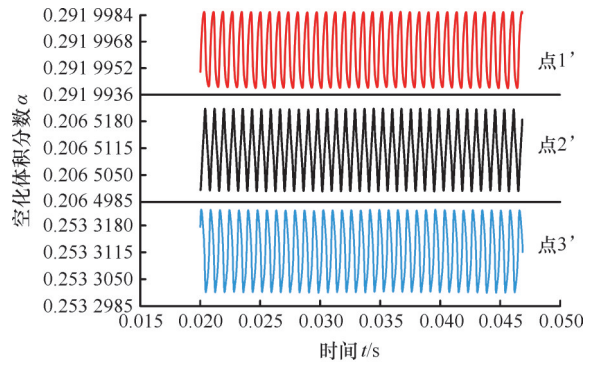
图 24 出口侧三点空化体积分数波动特征

Fig.24 Fluctuation of cavitation volume fraction at three points near the outlets

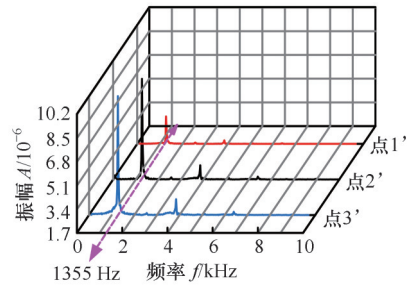
动较大,特征频率为 1355 Hz,由此这两个出口处空化体积波动对阀芯头部 qt 段液压力的影响较大。

图 25 所示为阀腔壁面侧监测点的空化数据,1'测点空化体积分数最大,即出口 2、3 之间的气相占比最高,这是因为气体在该区域内呈现类似的活塞往复运动,无法迅速、顺利排出。与测点 1 类似,1'处也存在持续性的气团堆积,导致此处的空化体积波动较小,而 2'、3'处空化波动幅值大,对 qt 段液压力的影响较大,阀腔壁面侧的空化体积分数波动主频与出口侧位置一致,均为 1355 Hz。

综上所述,空化对液压力的影响主要集中在阀芯 t1 段下部和头部 qt 的上段部分。三个出口间存在空化气泡动态迁移,诱发阀腔空化体积波



(a) 出口对侧空化体积分数时域波动



(b) 出口对侧空化体积分数频域特征

图 25 出口对侧三点空化体积分数波动特征

Fig.25 Fluctuation of cavitation volume fraction at three points opposite the outlets

动,在出口以非对称“活塞”特性型式排出,进而影响 qt 与 t1 段的液压力。qt 部分因空化气泡周期性变化呈现“体积峰—压力谷”的波动特性;t1 段受空化与超前涡流的双重影响,液压力与空化体积出现相位差。在空化初生的出口 2、3 及对应阀腔侧 2'、3' 位置,剧烈波动的空化主导 qt 液压力的脉动,而出口 1 及对应阀腔侧因气团持续堆积,对液压力波动的影响相对较小。

5 结论

1) 不考虑空化发生,液压力随开度的增加而减小。开关阀进出口压差越大,液压力变化幅度越大;开度越大,液压力减小速度越快,阀芯可控制开度越小。考虑空化时,由于气泡的生成、湮灭对阀芯产生顶托和冲击作用,增大了流体对阀芯所施加的液压力,液压力随开度的增大而减小的速度变缓。

2) 不考虑空化发生,背压的变化对液压力的影响较小;而在空化下,背压增大抑制了空化初生和发展,进而对液压力的影响较大。在背压增大的初期,抑制作用强,液压力快速减小;背压增至 1.2 MPa 后,空化程度趋于稳定,对液压力的影响减小,使得阀芯所受液压力随背压的增大呈近似线性减小。

3) 不考虑空化发生,随着开度的增加,高温下

液压力出现波动式增大;在空化工况下,随着开度的增加,各温度工况液压力趋于稳定。

4)空化对阀芯液压力的影响主要作用在阀芯t1下段和qt的上段部分;阀腔内空化气团以非对称“活塞”型式从三个出口依次排出,且出口2、3及对应阀腔侧空化波动较剧烈,是引起t1与qt段液压力波动的主导因素。

本研究主要聚焦于阀芯液压力,暂未考虑空化对液动力的影响。后续可通过综合考虑高速开关阀液压力-电磁力-弹簧力相互作用,对其动态特性和阀芯液动力进行探讨。

参考文献:

- [1] 王鹏飞. 油压锥阀阀口空化流动数值模拟[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
WANG Pengfei. Numerical Simulation of Cavitation Flow in Hydraulic Oil Poppet Valve[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016.
- [2] XU Xiaogang, FANG Liang, LI Anjun, et al. Numerical Analysis of the Energy Loss Mechanism in Cavitation Flow of a Control Valve[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 174: 121331.
- [3] BERNAD S I, SUSAN-RESIGA R. Numerical Model for Cavitation Flow in Hydraulic Poppet Valves[J]. Modelling and Simulation in Engineering, 2012, 2012(1): 742162.
- [4] LIU Jingbin, LIU Zhenming, WU Jiechang, et al. Numerical Study on Cavitation Flow Characteristics in Diesel Fuel Injector Control Valve[J]. International Journal of Automotive Technology, 2022, 23(4): 881-897.
- [5] 陈震. 阀芯旋转式高速开关阀特性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
CHEN Zhen. Research on Characteristics of Spool Rotary High-speed On-off Valve[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [6] 李树勋, 沈恒云, 张万年, 等. 活塞式流量调节阀空化特性及其压力脉动响应[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(12): 44-48.
LI Shuxun, SHEN Hengyun, ZHANG Wannian, et al. Cavitation Characteristics and Pressure Pulsation Response of Piston Type Flow Control Valve[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2020, 48(12): 44-48.
- [7] 李森林. 锥阀阀口空化瞬态周期性及效应的数值模拟[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
LI Senlin. Numerical Simulation of Transient Periodicity and Effect of Cavitation in Cone Valve Port[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.
- [8] LU Liang, LIANG Zhongdong, LIU Yuming, et al. Geometrical Transition Properties of Vortex Cavitation and Associated Flow-choking Characteristics in Poppet Valves[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2024, 25(6): 455-469.
- [9] 赵才虎, 陈誉, 朱天龙, 等. 不同结构参数对高速开关阀液压力的影响研究[J]. 机电工程, 2024, 41(1): 33-42.
ZHAO Caihu, CHEN Yu, ZHU Tianlong, et al. Influence of Different Structural Parameters on the Hydraulic Pressure of High-speed Switching Valves[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2024, 41(1): 33-42.
- [10] 顾岩城, 白军, 罗红英, 等. 高海拔下ZGB空化模型的修正及其对水翼空化的影响[J]. 中国农村水利水电, 2024(3): 255-261.
GU Yancheng, BAI Jun, LUO Hongying, et al. Modification of the ZGB Cavitation Model and Analysis of Its Effect on Hydrofoil Cavitation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(3): 255-261.
- [11] 谢永伟. 液控调节阀空化流场及压力脉动特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
XIE Yongwei. Study on Cavitation Flow Field and Pressure Pulsation Characteristics in Hydraulic Control Valve[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [12] 王春光, 刘晓薇, 刘展麟, 等. 某高速开关阀阀芯液压力影响因素研究[J]. 机床与液压, 2018, 46(13): 50-54.
WANG Chunguang, LIU Xiaowei, LIU Zhanlin, et al. Research on Factors that Affect Hydraulic Pressure of High Speed On-off Valve[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(13): 50-54.
- [13] 汪健生, 刘志毅. 管道节流过程中气蚀的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2008, 44(12): 100-104.
WANG Jiansheng, LIU Zhiyi. Numerical Simulation on Cavitation of Throttle in Tube[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(12): 100-104.
- [14] 王万春. 液压锥阀阀口空化流动数值模拟[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
WANG Wanchun. Numerical Simulation of Cavitation Flow in Hydraulic Poppet Valve[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.
- [15] 贺杰, 李文华, 李怀义, 等. 锥形节流阀中背压对空化流场的影响[J]. 流体机械, 2018, 46(2): 41-45.
HE Jie, LI Wenhua, LI Huaiyi, et al. Effect of back Pressure on Cavitation Flow Inside Throttle Valve[J]. Fluid Machinery, 2018, 46(2): 41-45.
- [16] GE Mingming, ZHANG Guangjian, PETKOVŠEK M, et al. Intensity and Regimes Changing of Hydrodynamic Cavitation Considering Temperature Effects[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 338: 130470.
- [17] HE Jie, ZHANG Yujia, LIU Xiumei, et al. Experiment and Simulation Study on Cavitation Flow in Pressure Relief Valve at Different Hydraulic Oil Temperatures[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2023, 89: 102289.
- [18] 赵一峰. 空化撞击流场压力波动特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.
ZHAO Yifeng. Research on Pressure Fluctuation Characteristics of Cavitation Impinging Stream Field [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020.

(编辑 陈勇)

作者简介: 陈誉*(通信作者),男,1990年生,讲师。研究方向为液压系统流体动力传输、流体机械过渡过程及系统稳定调控等。
E-mail:yuchen@njit.edu.cn.

本文引用格式:

陈誉,赵琛,何玉文,等. 空化与非空化下高速开关阀阀芯液压力特性研究[J]. 中国机械工程, 2026, 37(2): 285-294.

CHEN Yu, ZHAO Chen, HE Yuwen, et al. Research on Hydraulic Pressure Characteristics of High Speed Switching Valve under Cavitation and Non Cavitation Conditions[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(2): 285-294.