doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.045

温度效应对液压锥型节流阀内气穴形态的影响

张　健[1]　齐乃明[2]　姜继海[3]　孙健伟[4]

(1.哈尔滨工业大学空间环境与物质科学研究院,哈尔滨 150080;2.哈尔滨工业大学航天学院,哈尔滨 150001;
3.哈尔滨工业大学机电工程学院,哈尔滨 150080;4.哈尔滨商业大学轻工学院,哈尔滨 150028)

摘要:液压锥型节流阀具有节流温升大的特点,在阀口部位极易产生气穴,而温度效应对气穴发展变化的影响不容忽略。为此,本文对锥型节流阀内气穴形态受温度效应的影响进行了实验研究。搭建了锥型节流阀气穴实验系统,设置了不同的温度条件和压力条件,采用有机玻璃制造实验锥型节流阀,利用高速摄像机采集气穴形态图像数据。实验表明,锥型节流阀产生的初生气穴气泡半径约为 30 μm;温度升高会使气穴发展更加充分,同时会降低液压油对微小气核的束缚,产生的气泡数量更多,气穴更加明显;在低强度时,锥型节流阀内气穴为片状气穴,随着气穴强度的增加,气穴会发展为云状气穴。

关键词:锥型节流阀;液压;气穴;温度效应;气穴形态

中图分类号:TH137.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)09-0390-07　　**OSID**:

Effect of Temperature on Cavitation Shape in Hydraulic Conical Throttle Valve

ZHANG Jian[1]　QI Naiming[2]　JIANG Jihai[3]　SUN Jianwei[4]

(1. *Space Environment Simulation Research Infrastructure*, *Harbin Institute of Technology*, *Harbin* 150080, *China*
2. *School of Astronautics*, *Harbin Institute of Technology*, *Harbin* 150001, *China*
3. *School of Mechatronics Engineering*, *Harbin Institute of Technology*, *Harbin* 150080, *China*
4. *School of Light Industry*, *Harbin University of Commerce*, *Harbin* 150028, *China*)

Abstract: Aiming at the problem that the hydraulic conical throttle valve is easy to produce cavitation and has the characteristics of large temperature rise of throttle, and the influence of temperature effect on the development and change of cavitation can not be ignored, an experimental study was made on the influence of temperature effect on the cavitation shape in the conical throttle valve. The cavitation test system of conical throttle valve was built. In order to observe the cavitation of conical throttle valve conveniently, the experimental conical throttle valve was made of plexiglass, and the cavitation shape was collected by high-speed camera. Different temperature and pressure conditions were set up in the experiment. According to the acquired bubble images, it was determined that the initial bubble radius of the conical throttle valve was about 30 μm. The increase of temperature would make the cavitation develop more fully. At the same time, the increase of temperature would reduce the restriction of hydraulic oil on the micro-nucleus. The number of bubbles produced was more and the cavitation was more obvious, and the cavitation in the conical throttle valve was obtained. At low strength, it was flaky cavitation, and with the increase of cavitation strength, it would be changed into cloud-like cavitation. To sum up, temperature had a very obvious effect on cavitation.

Key words: conical throttle valve; hydraulic; cavitation; temperature effect; cavitation shape

0　引言

气穴是在流体机械、液压设备、喷油嘴、舰船螺旋桨、水下航行器等与液体有关的工业领域中常见的一种现象[1]。气穴是液体局部压力低于液体当前温度饱和蒸汽压时液体汽化产生大量气泡

收稿日期:2020-01-06　修回日期:2020-01-31

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB2001201)、国家自然科学基金青年科学基金项目(51805108)、中国博士后科学基金面上项目(2019M661271)、黑龙江省普通高等学校青年创新人才培养计划项目(UNPYSCT-2017205)和高等学校学科创新引智计划项目(B18017)

作者简介:张健(1983—),男,助理研究员,博士,主要从事流体传动与控制研究,E-mail:freezeman007@hit.edu.cn

的现象。气穴气泡的整个发展过程包括气泡初生、发展、压缩、最终溃灭。气穴的产生通常伴随着热力学效应，而气泡的最终溃灭则会在溃灭部位引起局部高温和高压。HSIAO 等[2]指出气泡溃灭后可形成高达 1.3 GPa 的压力。FLINT 等[3]指出气泡溃灭后可形成 5 075 K 的高温。高温高压会造成邻近气穴气泡的零件表面材料剥蚀，该现象被称为气蚀。锥型节流阀广泛应用于各类液压系统中，由于其自身结构特点，在阀口部位极易产生气穴。气穴往往使锥型节流阀产生气穴噪声和气蚀，以及导致阀口堵塞等，造成锥型节流阀使用性能下降，甚至失效。因此对锥型节流阀气穴的研究具有现实意义。

目前，对液压阀气穴的研究主要集中在理论和实验两方面。GAO 等[4]通过数值模拟研究了水压系统的锥阀气穴问题。冀宏等[5]研究了内流道形状对溢流阀气穴噪声的影响。LEE 等[6]研究了机械心脏阀的气穴机理。ZOU 等[7]研究了 U 型节流槽对滑阀气穴的影响，获得了气穴形态、气穴噪声等试验数据。PARK[8]研究了水压伺服锥阀，从结构设计角度对抑制气穴有一定的参考价值。WASHIO 等[9]利用高速摄像系统研究了液压锥阀的气穴形态，为气穴的理论研究提供了试验支持。LISOWSKI 等[10]利用 CFD 技术研究了逻辑阀的流场情况，其成果具有一定的理论价值。LUO 等[11]利用高速摄像系统获得了两个气穴气泡溃灭的过程。ZHANG 等[12]通过 CFD 与实验方法研究了水压节流阀的气穴问题。SHI 等[13]通过实验方法研究了水压节流阀抑制气穴的方法。NIEDŹWIEDZKA 等[14]利用 CFD 方法研究了液压系统内的气穴流。CHEN 等[15]研究了喷嘴挡板阀的噪声抑制方法。NAZARI-MAHROO 等[16]研究了液体粘度对气穴气泡的影响，充实了气穴热效应理论。李明学等[17]研究了吸油压力对外啮合齿轮泵气穴的影响。郑水华等[18]研究了摆线转子泵气穴特性。

目前，对液压阀内气穴及气穴机理的研究已有很多成果，但针对锥型节流阀内气穴的温度效应研究较少。本文通过实验方法研究锥型节流阀内产生气穴后温度效应对气穴的影响，从实验角度探究温度效应对气穴形态的影响规律，以期为气穴发展变化的理论研究以及锥型节流阀的优化设计提供技术支撑。

1　理论基础

1.1　基本假设

由于气穴从初生到溃灭的整个过程十分复杂，伴随着强烈的热力不平衡性，涉及物理化学等多方面影响，故对于气穴的理论研究需要进行必要的假设。气泡动力学描述的是气穴从气泡初生到气泡溃灭整个过程气泡形态的变化规律。目前气泡动力学的基础是 Lord Rayleigh 于 1917 年推导的气泡动力学方程。本文对气泡动力学的研究也是基于 Rayleigh 的气泡动力学方程。根据相关研究，液体中存在气核以及低压区的产生是气穴形成的两个必要条件。结合液体中存在气核这一必要条件，针对气泡动力学的理论研究，本文作如下假设：在气穴气泡从初生到溃灭的整个过程中，气泡将始终保持球形；在气穴气泡从初生到溃灭的整个过程中，不发生化学反应；自由气核仅含有液体的蒸汽和空气；气穴气泡与周围液体不发生相对移动；气穴气泡内气体压力沿径向均匀分布。

1.2　数学模型

假设气泡的整个生命周期是等温过程，泡内温度和周围液体温差为[19]

$$T_b - T_l = -\frac{R}{\sqrt{\alpha_l \Delta t}} \frac{\rho_v L}{\rho_l c_{pl}} \tag{1}$$

式中　T_b——气泡内温度，K

T_l——气泡周围液体温度，K

R——气泡半径，m

L——液体汽化潜热，J/kg

Δt——到达气泡半径所用时间，s

α_l——液体热扩散率，m^2/s

c_{pl}——液体定压比热容，J/(kg·K)

ρ_v——蒸汽密度，kg/m^3

ρ_l——液体密度，kg/m^3

在热力学影响下液体饱和蒸汽压差为

$$\Delta p_v = \frac{R}{\sqrt{\alpha_l \Delta t}} \frac{(\rho_v L)^2}{\rho_l c_{pl} T_l} \tag{2}$$

气泡温度时饱和蒸汽压为

$$p_v(T_b) = p_v(T_l) - \Delta p_v \tag{3}$$

式中　$p_v(T_b)$——气泡温度时液体饱和蒸汽压，Pa

$p_v(T_l)$——液体温度时液体饱和蒸汽压，Pa

引入参数

$$\Sigma = \frac{(\rho_v L)^2}{\rho_l^2 c_{pl} T_l \sqrt{\alpha_l}} \tag{4}$$

考虑热效应的 Rayleigh－Plesset 方程[19]为

$$\rho_l \left[R \frac{\mathrm{d}^2 R}{\mathrm{d}t^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t} \right)^2 \right] + \Sigma \frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t} \sqrt{t} \rho_l =$$

$$p_v(T_l) - p_\infty + p_{g_0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2S}{R} - \frac{4\mu}{R} \frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t} \tag{5}$$

式中　p_∞——气泡外液体压力，Pa

p_{g_0}——初始时刻泡内气体压力，Pa

R_0——初始时刻气泡半径,m

S——液体的表面张力系数,N/m

μ——液体的动力粘度,Pa·s

γ——多变指数,气体定压比热容与定容比热容之比

气泡内压力为[20]

$$p_B = p_v + p_\infty \frac{R_0}{R}\frac{T_b}{T_\infty} \tag{6}$$

式中 T_∞——参考温度,K

由式(6)可得

$$p_{g_0}\left(\frac{R_0}{R}\right)^{3\gamma} = p_\infty \frac{R_0}{R}\frac{T_b}{T_\infty} \tag{7}$$

将式(1)代入式(7)得

$$p_{g_0}\left(\frac{R_0}{R}\right)^{3\gamma} = p_\infty \frac{R_0}{R}\frac{-\dfrac{R}{\sqrt{\alpha_l \Delta t}}\dfrac{\rho_v L}{\rho_l c_{pl}} + T_l}{T_\infty} \tag{8}$$

蒸汽密度为[21]

$$\rho_v = \frac{p_\infty}{R_v T_l} \tag{9}$$

式中 R_v——蒸汽气体常数,J/(kg·K)

液体饱和蒸汽压可表达为[22]

$$p_v(T_l) = p_r \exp\left(\frac{L}{R_v}\left(\frac{1}{T_\infty} - \frac{1}{T_l}\right)\right) \tag{10}$$

式中 p_r——参考温度下的饱和蒸汽压,Pa

从理论分析可知,当温度升高时,液体的饱和蒸汽压会随着温度的升高而升高,表明温度越高,形成气穴的条件越容易达到,即气穴的强度会随着温度的升高而增强。同时由式(5)可知,当考虑温度影响时,温度的升高会加速气泡的膨胀,气穴会更加明显。

2 实验

为了探寻液压锥型节流阀气穴产生后受温度效应的影响程度以及受温度效应的影响规律,本文对气穴形态的图像采集以及影响气穴形态的压力、温度、流量等数据的采集与处理进行研究。为此搭建了液压锥型节流阀可视化实验台,该实验台包括液压油源系统和高速摄像系统两部分。

2.1 实验系统

实验系统原理如图 1 所示。溢流阀调定实验阀入口压力;液压泵给系统供油;温度/压力传感器测量实验阀入口温度和压力;高速摄像机采集气穴状态;压力传感器测量实验阀出口压力;节流阀调节背压;涡轮流量传感器测量系统流量。实验系统如图 2 所示。为观察锥型节流阀内的气穴,实验节流阀采用高透明性的有机玻璃(PMMA)制造。实验节流阀结构如图 3 所示。实验系统参数如表 1 所示。

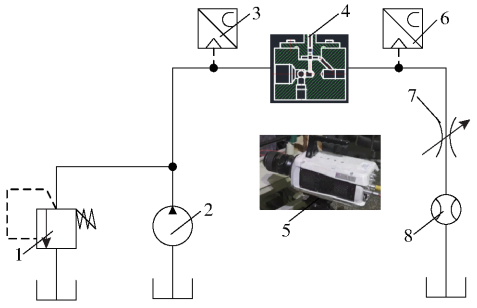


图 1 实验系统原理图

Fig. 1 Principle of experimental system

1. 溢流阀 2. 液压泵 3. 温度/压力传感器 4. 实验节流阀 5. 高速摄像机 6. 压力传感器 7. 节流阀 8. 流量传感器

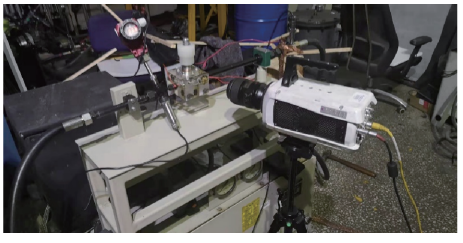


图 2 实验系统

Fig. 2 Experimental system

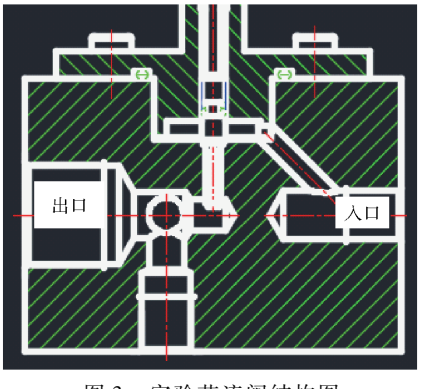


图 3 实验节流阀结构图

Fig. 3 Experimental throttle valve structure

表 1 实验系统参数

Tab. 1 Experimental system parameters

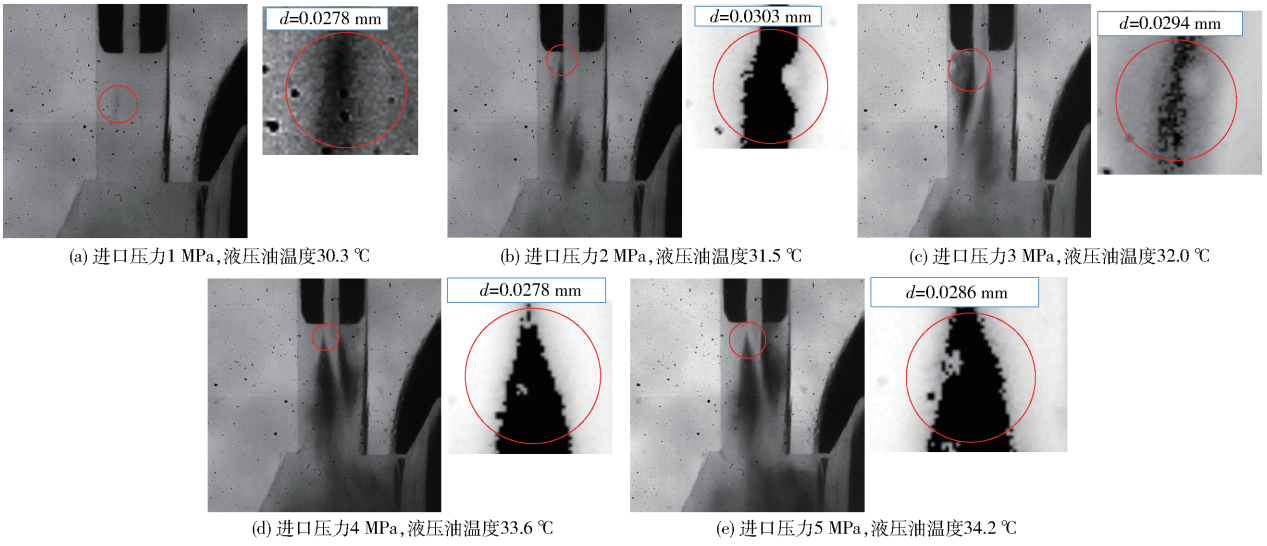
参数	额定压力/MPa	液压油型号	额定流量/(L·min^{-1})	实验温度/℃	实验压力/MPa	背压/MPa
数值/型号	6.3	32 号抗磨液压油	0~25	20~50	1~5	0~1

为研究锥型节流阀工作时节流温升产生的温度效应对气穴形态的影响,实验中并未单独控制温度,实验中采集的温度都是节流阀工作时的实际温度。本文采用的高速摄像系统最高可达到 1×10^4 f/s 的采集速度,完全能够保证气穴形态的采集工作顺利进行。有机玻璃材质具有很好的透明性,并且有一定的强度,在实验过程中可以将工作压力设置为至少 5 MPa,能够模拟锥型节流阀在低压条件下的工

作情况。

2.2　实验结果

为获得气穴初生气泡初始尺度，将阀口开度固定，分别获得了背压为 0 时不同系统压力温度情况下的气泡尺度。图 4 为不同进口压力和不同液压油温度下的气泡初生图像。



(a) 进口压力1 MPa，液压油温度30.3 ℃　(b) 进口压力2 MPa，液压油温度31.5 ℃　(c) 进口压力3 MPa，液压油温度32.0 ℃

(d) 进口压力4 MPa，液压油温度33.6 ℃　(e) 进口压力5 MPa，液压油温度34.2 ℃

图 4　不同进口压力、液压油温度的气泡初生图像

Fig. 4　Initial bubble images at different inlet pressures and hydraulic oil temperatures

由图 4 可知，锥型节流阀内气穴在初生时并不是产生单个气泡，而是产生多个气泡，初生气泡平均直径约 30 μm，并且随着液压系统温度和压力的变化，气泡初生时的平均直径变化并不大，说明在对锥型节流阀内气穴进行理论研究时，当系统参数条件一定时初生气泡的初始直径可以假定为一个定值，在本文的参数条件下可将初始气泡半径假定为 30 μm。该数值与文献[18]所提初生气泡直径在尺度上基本一致。说明温度对气穴的影响并不体现在初生气泡直径，与气穴由存在于液体内的微小气核产生的理论假设相一致。气穴初生时的气泡半径只与微小气核的大小有关。

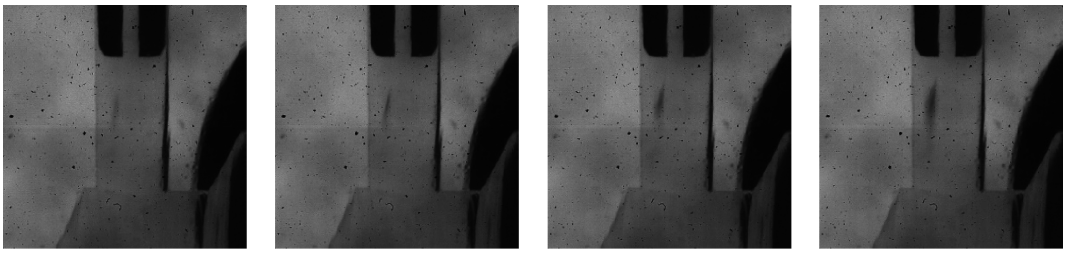
图 4 右侧的图为左侧图的局部放大 8 倍图，气泡尺寸的测量采用了高速摄像机图像处理软件中的测量工具。软件测量的气泡尺寸与实际气泡尺寸有一定的偏差，故本文得到的气泡平均直径不是绝对值，而是估算值，偏差级别在 0.000 1 mm。

图 5 为阀进口压力 1 ~4 MPa、背压 0 时的气穴形态变化。由图 5 可知，随着进口压力的增加，阀口处压差增大，更容易产生气穴，气穴强度随着阀口处压差增大而增加，同时在锥型节流阀内的气穴在气泡数量较少时产生的是片状气穴，随着初生气泡大量产生，气泡云会形成，随着气泡数量的增多气泡云越来越明显。由图 5a 可知，此时气泡数量并不是很多，气穴气泡聚集在一起形成的形状是片状。由图 5b 可知，此时气泡数量较图 5a 有明显增多，初始时刻还是呈片状，但随着气穴的发展呈现出气泡云。由图 5c、5d 可知，气泡数量进一步增加，初始时刻已经开始呈现云状，尤其是图 5d，气泡最终几乎占满整个流道。

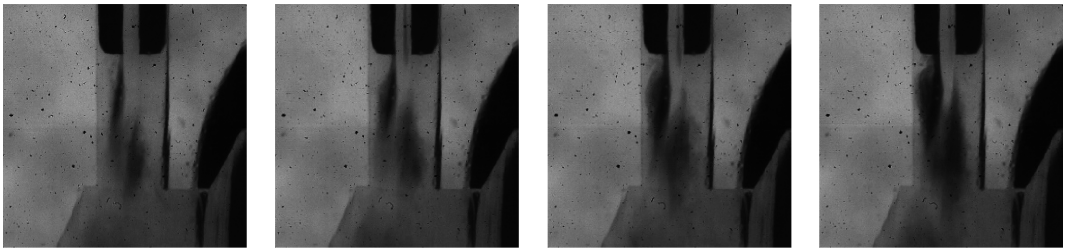
为探究温度对气穴状态的影响，本文分别在开度、系统压力、背压一定时采集了气穴形态变化过程。图 6 为在不同图像采集温度条件下的进口压力。图 7 为在不同图像采集温度条件下的流量。由图 6、7 可知，在图像采集时阀压力条件和流量条件变化不大，可近似认为图像采集时阀的工作条件只有温度在改变。图 8 为系统压力 5 MPa、背压 0、温度分别为 34.2、35.7、37.0、40.0、41.0℃时的气穴发展过程。由图 8 可知，当温度升高时，气泡的发展更加充分，非常明显地观察到气穴从 34.2℃时未完全充满流道到 41.0℃时几乎完全充满流道。表明温度对气穴的发展有重要影响，温度越高，气穴在锥型节流阀内发展越充分，对锥型节流阀性能的影响也越大，这与理论分析获得的结论相一致。同时，由图 8 可知，温度不只影响气穴发展程度，也影响着初生气泡的数量，在温度较低时初生气泡数量明显少于温度高时。

由图 5 可知，锥型节流阀气穴随着强度的增加由片状气穴转变为云状气穴，在低强度时，气穴为片状气穴，在高强度时气穴为云状气穴，在锥型节流阀内通常不产生单气泡气穴现象，因此对锥型节流阀气穴的理论研究应将多个气泡的相互影响考虑进去。

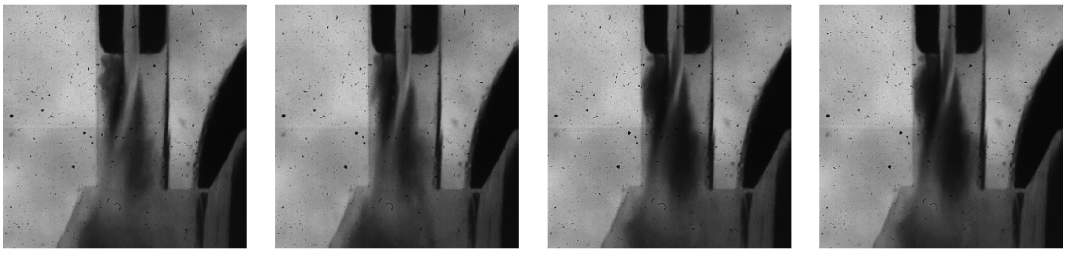
综上可知，温度对气穴的影响主要表现在对气穴强度及形态的影响上，不同温度条件下，微小气核



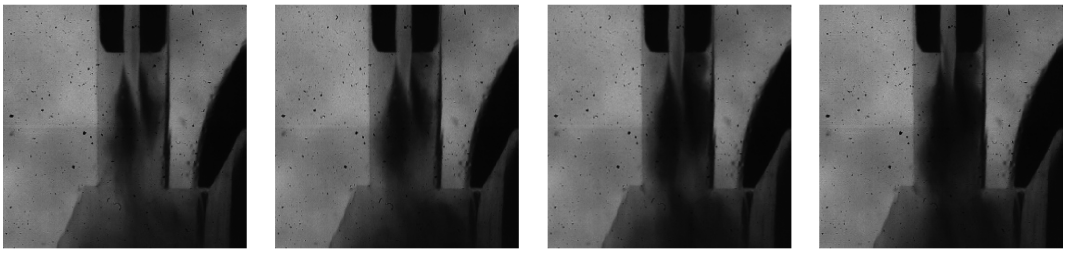
(a) 阀进口压力1 MPa



(b) 阀进口压力2 MPa



(c) 阀进口压力3 MPa



(d) 阀进口压力4 MPa

图 5 气穴形态变化

Fig. 5 Changes in cavitation morphology

形成气泡的难易程度不一样,温度越高气核受到的束缚越小,气核越容易形成气泡,同时温度越高气泡发展越充分,气泡直径发展的越大,气穴强度也就越大。

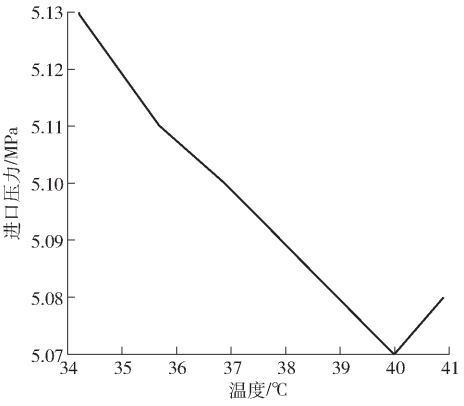


图 6 不同图像采集温度条件下的进口压力

Fig. 6 Inlet pressure under different image acquisition temperature conditions

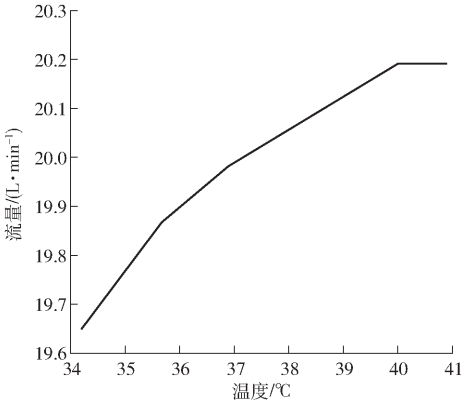
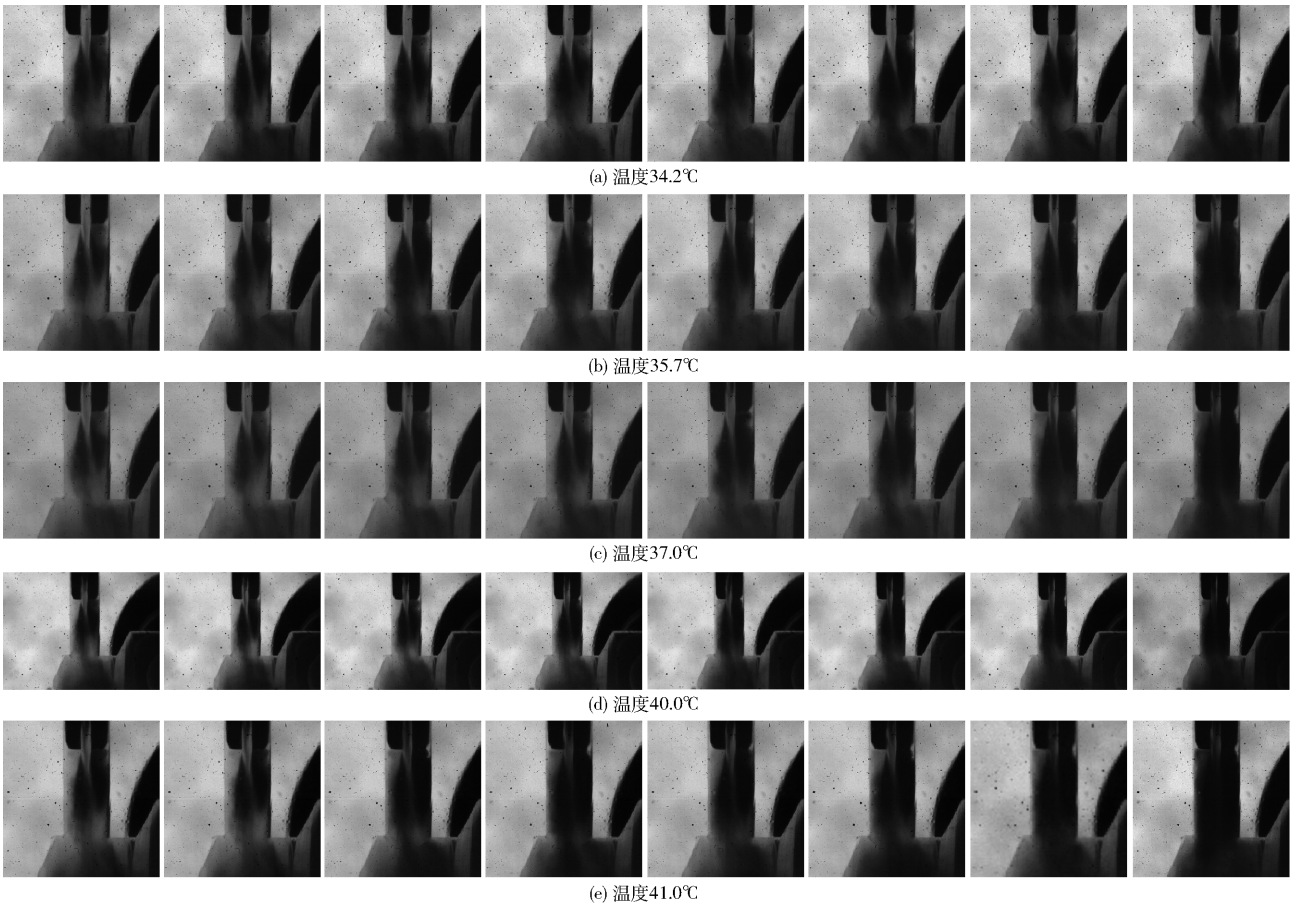


图 7 不同图像采集温度条件下的流量

Fig. 7 Flow rate at different image acquisition temperatures

3 结论

(1)在当前实验参数下,锥型节流阀内气穴气泡初生时的直径变化不大,平均直径约为 30 μm,在对锥型节流阀内气穴进行理论研究时,相同参数条



(a) 温度34.2℃

(b) 温度35.7℃

(c) 温度37.0℃

(d) 温度40.0℃

(e) 温度41.0℃

图 8　系统压力 5 MPa 时气穴发展过程

Fig. 8　Cavitation development process at system pressure of 5 MPa

件下可将初生气泡直径假定为定值。

(2)锥型节流阀内的气穴会随着温度的升高而获得更充分的发展,同时温度也影响气穴初生气泡的数量,温度越高,初生气泡越多。

(3)锥型节流阀内的气穴主要是片状和云状气穴,气穴初生时通常会产生大量气泡,随着气泡数量的增加,气穴会由片状形态最终发展为气泡云。

参　考　文　献

[1] GONCALVES E. Numerical study of expansion tube problems: toward the simulation of cavitation[J]. Computers & Fluids, 2013,72:1 – 19.

[2] HSIAO C T, JAYAPRAKASH A, KAPAHI A, et al. Modelling of material pitting from cavitation bubble collapse[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2014,755:142 – 175.

[3] FLINT E B, SUSLICK K S. The temperature of cavitation[J]. Science, 1991,253(5026):1397 – 1399.

[4] GAO Hong, FU Xin, YANG Huayong, et al. Numerical investigation of cavitating flow behind the cone of a poppet valve in water hydraulic system[J]. Journal of Zhejiang University Science, 2002,3(4):395 – 400.

[5] 冀宏, 傅新, 杨华勇. 内流道形状对溢流阀气穴噪声影响的研究[J]. 机械工程学报, 2002,38(8):19 – 22.
JI Hong, FU Xin, YANG Huayong. Effects of internal structure on cavitation noise of hydraulic relief valve[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2002,38(8):19 – 22. (in Chinese)

[6] LEE H, TAENAKA Y. Mechanism for cavitation phenomenon in mechanical heart valves[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2006,20(8):1118 – 1124.

[7] ZOU J, FU X, DU X W, et al. Cavitation in a non-circular opening spool valve with U-grooves[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A-Journal of Power and Energy, 2008,222(4):413 – 420.

[8] PARK S H. Design and performance characteristic analysis of servo valve-type water hydraulic poppet valve[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(9):2468 – 2478.

[9] WASHIO S, KIKUI S, TAKAHASHI S. Nucleation and subsequent cavitation in a hydraulic oil poppet valve[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science, 2010,224(4):947 – 958.

[10] LISOWSKI E, RAJDA J. CFD analysis of pressure loss during flow by hydraulic directional control valve constructed from logic

valves[J]. Energy Conversion and Management, 2013,65:285 – 291.

[11] LUO J, XU W, LI R. High-speed photographic observation of collapse of two cavitation bubbles[J]. Science China-Technological Sciences, 2016, 59(11):1707 – 1716.

[12] ZHANG Zuti, CAO Shuping, LUO Xiaohui, et al. New approach of suppressing cavitation in water hydraulic components[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2016,231(21): 4022 – 4034.

[13] SHI Weijie, CAO Shuping, LUO Xiaohui, et al. Experimental research on the cavitation suppression in the water hydraulic throttle valve[J]. Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME, 2017, 139(5):051302.

[14] NIEDŹWIEDZKA A, LIPIŃSKI S, KORNET S. Verification of CFD tool for simulation of cavitating flows in hydraulic systems [J]. Journal of Hydroinformatics, 2017,19(5):653 – 665.

[15] CHEN Meng, XIANG Dong, LI Songjing, et al. Suppression of squeal noise excited by the pressure pulsation from the flapper-nozzle valve inside a hydraulic energy system[J]. Energies, 2018,11(4):955.

[16] NAZARI-MAHROO H, PASANDIDEH K, NAVID H A, et al. How important is the liquid bulk viscosity effect on the dynamics of a single cavitation bubble? [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018,49:47 – 52.

[17] 李明学, 杨国来, 李晓青, 等. 吸油压力对外啮合齿轮泵空化特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(3):420 – 426.
LI Mingxue, YANG Guolai, LI Xiaoqing, et al. Influence of suction pressure on cavitation characteristics of external gear pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3):420 – 426. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20190348&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.048. (in Chinese)

[18] 郑水华, 牟成琪, 谷云庆, 等. 凸舌油槽对摆线转子泵空化特性的影响[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3):412 – 419.
ZHENG Shuihua, MOU Chengqi, GU Yunqing, et al. Influence of tongue oil groove on cavitation characteristics of cycloid gerotor pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3):412 – 419. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190347&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.047. (in Chinese)

[19] PETKOV E M, DULAR M. Observing the thermodynamic effects in cavitating flow by IR thermography[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017,88:450 – 460.

[20] PENG K, TIAN S, LI G, et al. Cavitation in water jet under high ambient pressure conditions[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017,89:9 – 18.

[21] CHEN T, HUANG B, WANG G, et al. Numerical study of cavitating flows in a wide range of water temperatures with special emphasis on two typical cavitation dynamics[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016,101:886 – 900.

[22] AKTERSHEV S, OVCHINNIKOV V. Vapor bubble growth at the surface of flat and cylindrical heaters[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008,17(3):227 – 234.