

# 电控单体泵锥阀下游区域瞬态流场变化特性研究

安晓东 刘兴华 孙柏刚 胡煦东

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

**摘要:** 电控单体泵导通高低压油路时, 锥阀区域流场十分复杂, 对泄压断油特性影响比较大, 为了研究电控单体泵喷油系统回油过程中锥阀下游区域瞬态流场的变化特性, 利用高速摄像方法, 对锥阀下游流场进行了可视化试验, 提取空化泡群的边界轮廓并计算其亮度, 对其空化周期时间和亮度变化进行了分析, 并结合 Fluent 软件对瞬态流场变化进行了仿真计算。结果表明: 随着凸轮转速的增加, 锥阀下游区域流场发生空化现象的平均空化周期时间近似呈线性减小, 平均亮度逐渐增大; 随着锥阀阀芯的往复运动, 锥阀下游区域出现多个涡流区域, 并不断变化; 在怠速工况 (500 r/min), 平均空化周期时间和波动标准偏差最大, 分别为 4.5 ms 和 0.15。

**关键词:** 电控单体泵; 锥阀; 瞬态流场; 空化泡群

中图分类号: TK421+.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)05-0360-06

## Change Characteristics of Transient Flow Field in Poppet Valve Downstream Area of Electronic Unit Pump

An Xiaodong Liu Xinghua Sun Baigang Hu Xudong

(School of Mechanical and Vehicle Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Electronic unit pump system is a type fuel injection system with high injection pressure which can be applied to control fuel quantity and timing of injection flexibly. The solenoid valve in the electronic unit pump (EUP) controls pressure buildup within the high-pressure fuel line. When it is open, high-pressure fuel transfers with high velocity from the narrow cross-section into the low-pressure fuel line. During its operation, the flow in the field of solenoid valve is quite complex that affects the performance of EUP. In order to study the change characteristics of transient flow fields in poppet valve downstream area during the oil return process of an electronic unit pump injection system, a diaphanous glass window was designed in the pump. High-speed photography was introduced to visually investigate the transient flow fields. By means of experiment data, extracted the cavitation image boundaries and calculated the brightness of the cavitation bubble clouds, the cavitation periodic time and the change of brightness were analyzed and calculated. The test results show that with the increase of the cam rotational speed, the average cavitation periodic time was decreased almost linearly, and the average brightness was increased gradually. At the idle condition (500 r/min), the average cavitation periodic time and the standard deviation of fluctuation are maximum, which are 4.5 ms and 0.15 respectively. Furthermore, the simulation was conducted based on the test data such as the pressure and the displacement of valve core. The simulation results of cavitation phenomenon occur along opening process of valve. In the process of reciprocating motion of valve core, several swirling regions appear in the flow field of poppet valve downstream area, and keep constantly changing. The streamlines have significant influence on swirling regions.

**Key words:** electronic unit pump; poppet valve; transient flow field; cavitation bubble cloud

## 引言

电控单体泵喷油系统在供油过程中, 高压燃油通过锥阀间隙进入低压油路, 引起低压油路压力波动变化, 从而对进油过程产生影响, 导致喷油过程出现循环喷油量和喷油峰值压力不一致, 影响喷油过程的精确控制。目前关于锥阀区域流场的研究表明: 当流体通过锥阀区域时, 引起压力波动; 锥阀区域通常会产生涡流, 当低于流体饱和蒸汽压时, 出现空化现象, 形成两相流, 造成能量消耗<sup>[1-4]</sup>; 当空化气泡溃灭时, 产生噪声和振动, 并对壁面产生压力冲击<sup>[5]</sup>, 影响流体的连续性和物理属性<sup>[6-7]</sup>; 改变锥阀区域的结构参数能够使流体的流线依附方式、空化区域位置、锥阀流量系数和涡流强度发生变化<sup>[8-10]</sup>。

以上对锥阀区域流场变化特性的研究是在低压稳态条件下进行的, 而电控单体泵锥阀区域流场是高压瞬态流场, 剧烈的流场变化会影响喷油系统的供油过程。因此, 本试验拟了解电控单体泵锥阀下游区域高压瞬态流场的变化特性, 减小低压油路压力波动对供油过程的影响, 从而提高电控单体泵的供油一致性, 为电控单体泵锥阀设计提供参考依据。在试验过程中, 采用高速摄影拍摄方法和 Fluent 流场分析方法, 分别研究锥阀下游区域空化周期时间和亮度变化特性, 以及涡流区域变化特性。

## 1 光学试验系统和试验过程

### 1.1 光学试验系统

电控单体泵喷油系统在喷油结束后, 电磁阀线圈断电, 锥阀阀芯在回位弹簧的作用下向上移动, 导通了高压油路和低压油路, 如图 1 所示。为了拍摄燃油在回油过程中锥阀下游区域流场的变化, 采用石英玻璃部件代替电控单体泵止推挡板, 对锥阀下游区域流场在端面方向的变化情况进行拍摄。

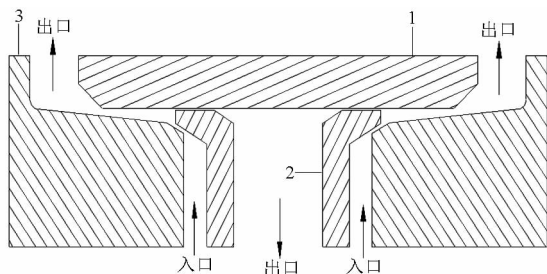


图 1 锥阀区域结构图

Fig. 1 Structure diagram of poppet valve area

1. 电控单体泵止推挡板 2. 锥阀 3. 锥阀座

图 2 为电控单体泵光学试验系统结构示意图。

由图中可知, 整个试验系统包括 5 部分: 油泵试验台系统、电控单体泵喷油系统、电控单元 (ECU)、高速摄像系统和数据采集系统。其中, 油泵试验台的低压供油系统由油箱、低压输油泵、溢流阀和回油限压阀等组成; 高速摄像系统由高速摄像机和氙灯等组成; ECU 主要作用为控制电控单体泵供油正时和供油持续期, 以及控制高速摄像机同步拍摄; 电控单体泵喷油系统由电控单体泵、高压油管 and 喷油器等组成; 数据采集系统主要采集电控单体泵泵端压力  $U_p$ 、电控单体泵回油油路压力  $U_L$ 、电控单体泵锥阀阀芯升程  $h$  和照片数据  $U_H$ 。表 1 为主要试验设备的参数。

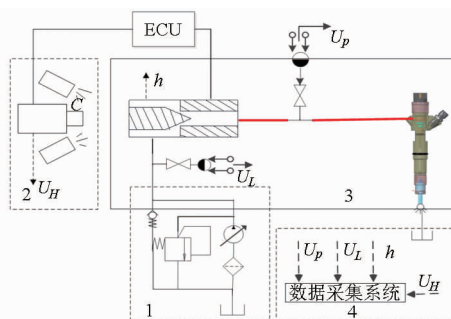


图 2 电控单体泵光学试验系统结构示意图

Fig. 2 Optical experimental system diagram of electronic unit pump

1. 油泵试验台低压供油系统 2. 高速摄像系统 3. 电控单体泵喷油系统 4. 数据采集系统

表 1 主要试验设备参数

Tab. 1 Parameters of experimental equipment

仪器名称	型号	主要参数指标
油泵试验台	山东泰安 12PSDB	额定功率 22 kW
电控单体泵	Bosch 0414401105	柱塞直径 $\phi 11$ mm
喷油器	道依茨 02112960	开启压力 22 MPa
压力传感器	Kistler 4067C3000	量程 0 ~ 300 MPa
高速摄像机	FASTMultima 512	分辨率 800 像素 $\times$ 600 像素
位移传感器	FT20-RA-60	量程 0 ~ 60 mm

### 1.2 试验过程

在试验过程中, 凸轮转速分别为 300、500、700、900、1 000 r/min, 电控单体泵供油持续期分别为  $14^\circ\text{CA}$ 、 $18^\circ\text{CA}$  和  $26^\circ\text{CA}$ ; 在电控单体泵喷油过程结束时刻, 同步触发高速摄像机拍摄 (拍摄速度为 8 000 帧/s, 每帧曝光时间为 0.125 ms)。

## 2 试验结果分析

### 2.1 空化泡群边界轮廓提取和亮度计算方法

图 3 为空化照片的处理过程。由于电控单体泵结构的限制, 拍摄到的空化泡群只能通过区域 2 (图 3a) 反映, 因此首先提取空化泡群, 如图 3b 所示。为了计算空化泡群变化的周期时间, 利用

Matlab 软件对空化泡群提取边界轮廓,如图 3c 所示。为了反映空化泡群的强度,计算其亮度,计算方法为:在空化泡群灰度照片中,0 表示纯黑色,255 表示纯白色,区域 2 内每一点的灰度与 255 的比值表示该点的亮度<sup>[11]</sup>,求所有点的亮度之和,即该时刻空化泡群对应的亮度。

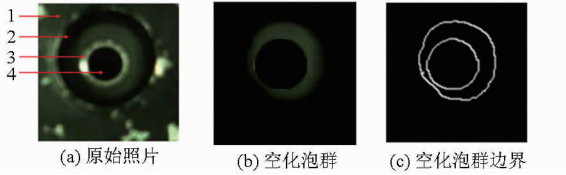
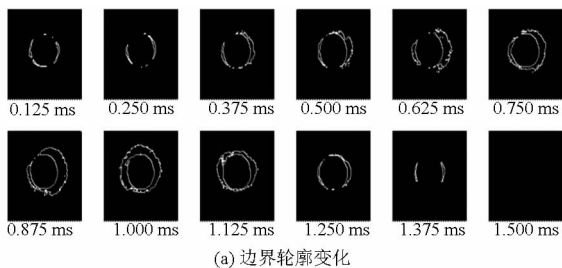


图 3 空化照片处理过程

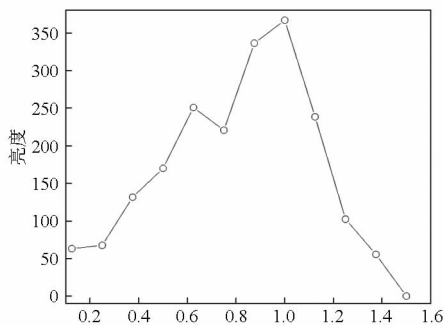
Fig. 3 Process of dealing with cavitation picture

1. 电控单体泵电磁阀端面
2. 锥阀下游区域
3. 锥阀阀芯端面
4. 锥阀阀芯中心回油孔

空化泡群周期时间的计算方法为:把出现空化泡群的前一帧照片作为空化泡群空化过程的起始时刻,空化泡群消失的那一帧照片的对应时刻作为结束时刻。为了说明空化泡群边界轮廓提取和亮度计算方法,根据以上处理方法,选择任意一个电控单体泵锥阀回油过程,对其空化泡群照片进行处理;图 4 所示为凸轮转速 900 r/min、供油持续期 14°CA 时,电控单体泵锥阀下游区域空化泡群的边界轮廓变化和亮度变化。由图中可知,空化泡群的发生、发展和溃灭过程共经历了 1.5 ms;亮度显示,空化强度不断增强,在 0.750 ms 时出现一次波动变化,然后达到最大亮度后,迅速减弱。



(a) 边界轮廓变化



(b) 亮度变化

图 4 空化泡群边界轮廓和亮度变化

Fig. 4 Changes of boundary profile and brightness cavitation bubble cloud

## 2.2 空化周期时间和亮度随转速的变化

图 5 为供油持续期 18°CA, 凸轮转速分别为 300、500、700、900、1 000 r/min 时,锥阀下游区域空化泡群空化周期时间随连续循环次数的变化。由图中可知,在连续循环的回油过程中,空化周期时间存在循环波动,其中凸轮转速在 300 r/min 时波动变化最大,最大波动量为 1.375 ms;当凸轮转速为怠速工况(500 r/min)时,空化周期时间最长,为 4.875 ms;随着凸轮转速的增加,空化周期时间逐渐减小。上述变化结果原因为:当凸轮转速低于怠速工况(500 r/min)时,喷油压力不稳定,一致性较差,从而造成回油压力低且波动大;随着转速的增加,喷油压力增大,喷油过程趋于稳定,在回油过程中通过锥阀阀口的燃油流速增大,从而使相同供油持续期的空化周期时间减少,且趋于稳定。

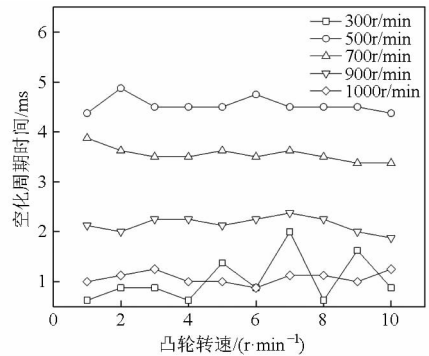


图 5 空化周期时间变化曲线

Fig. 5 Change of cavitation periodic time

图 6 为平均空化周期时间(把连续 10 个空化泡群空化周期时间的平均值看作对应工况点的平均空化周期时间)和平均亮度(锥阀下游空化泡群在循环周期内亮度的平均值)随凸轮转速的变化。由图中可知,当凸轮转速大于怠速工况(500 r/min)后,平均空化周期时间近似呈线性减小,亮度逐渐增大,在凸轮转速分别为 500、700、900、1 000 r/min 时,平均空化周期时间分别为 4.538、3.55、2.15、1.075 ms,平均亮度分别为 66.7、120、163、210。以

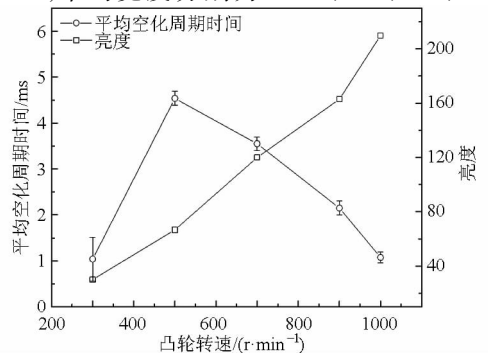


图 6 平均空化周期时间和亮度变化曲线

Fig. 6 Change of average cavitation periodic time and brightness

上结果说明：随着凸轮转速的增加，空化泡群的空化强度逐渐增强，平均空化周期时间逐渐减小。

### 3 仿真计算

电控单体泵锥阀下游区域空化泡群轮廓边界和亮度在回油过程中随时间不断变化，为了分析其变化原因，采用 Fluent 流场分析方法对锥阀区域流场进行仿真计算。在选择仿真工况时，考虑以上试验分析结果，转速越高，供油持续期越长，锥阀空化泡群的变化越明显；选择高转速和长供油持续期作为仿真试验工况时，容易分析其变化原因，所以选择凸轮转速 900 r/min、供油持续期 26°CA，对其工况进行仿真过程计算。

#### 3.1 边界条件

电控单体泵锥阀在凸轮转速为 900 r/min，供油持续期为 26°CA 试验工况，进油压力  $p_U$ 、回口压力  $p_D$  和锥阀阀芯升程  $h$  随时间的变化如图 7。在仿真计算过程中，分别以试验值  $p_U$ 、 $p_D$  和  $h$  作为入口压力、出口压力和阀芯升程移动边界条件；另外，柴油密度为 837 kg/m<sup>3</sup>，饱和蒸汽压为 3 540 Pa。

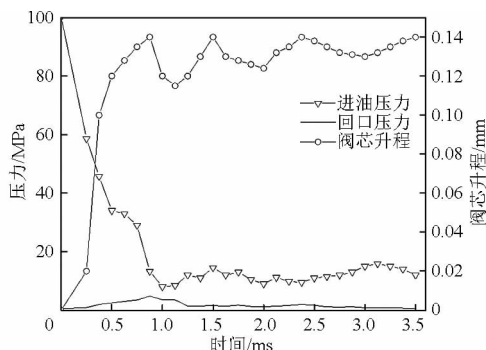


图 7 边界条件

Fig.7 Boundary conditions

#### 3.2 数学模型和结果校核

如图 8 所示，对电控单体泵锥阀区域进行非结构化网格划分，并对锥阀阀芯与锥阀座之间最小间隙(0.01 mm)处的锥阀面区域进行加密处理，划分后的网格个数为 100 596。在 Fluent 仿真计算过程中，选择标准 RNG 湍流模型，采用完全空化模型(不考虑相间的能量交换)和二阶线性逆风差分算法<sup>[12-16]</sup>，锥阀阀芯壁面为动网格边界壁面。

试验结果校核，计算空化参数  $k = p_U / (p_U - p_D)$ ，其中  $p_U$  为锥阀上游压力， $p_D$  为锥阀下游压力。试验值的空化参数  $k_t$  的  $p_U$  和  $p_D$  分别取  $U_p$  和  $U_L$ ，仿真值的空化参数  $k_s$  的  $p_U$  和  $p_D$  分别取锥阀阀口 a 和 b 处的计算压力。由表 2 可知，试验和仿真空化参数  $k$  的误差小于 5%，说明仿真过程与实际流场一致性比较好，仿真结果能够反映电控单体泵锥阀下游区

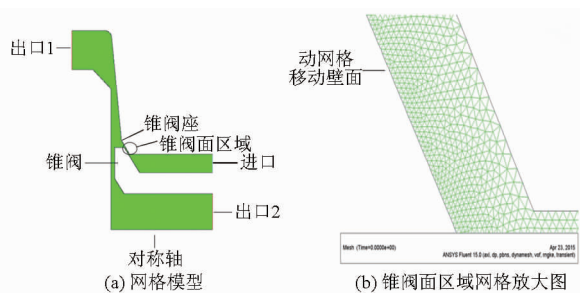


图 8 电控单体泵锥阀网格模型

Fig.8 Mesh model of poppet valve in electronic unit pump

表 2 试验和仿真空化参数  $k$  对比

Tab.2 Comparison of cavitation parameter  $k$

时间/ ms	试验值			仿真值			误差/ %
	$p_U$ / MPa	$p_D$ / MPa	$k_t$	$p_U$ / MPa	$p_D$ / MPa	$k_s$	
0.250	58.6	0.9	1.02	58.0	-0.87	0.995	3.10
0.325	49.5	1.9	1.04	47.9	-0.12	0.998	4.25
0.875	13.3	4.8	1.56	12.9	4.3	1.50	4.31
1.125	8.45	3.5	1.71	8.3	3.3	1.66	2.85
2.375	9.5	2.0	1.27	9.0	1.8	1.25	1.33
2.875	13.0	1.2	1.10	12.5	0.735	1.06	3.69
3.125	15.9	0.82	1.05	16.5	0.603	1.04	3.91

域流场的变化。

#### 3.3 仿真结果分析

图 9 为锥阀区域流场在回油过程中，柴油蒸汽相体积分数的变化。由图中可知，在 0.05 ms 时刻，锥阀下游出现了涡流空泡区域 A；随着锥阀阀芯向左移动，在 0.25 ms 时刻，锥阀下游出现了涡流空泡区域 A、B 和 C；在 0.35 ms 时刻，涡流空泡区域 A、B 和 C 相对 0.25 ms 时刻对应的涡流空泡区域有很大程度的减小；在 0.85 ms 时刻，锥阀阀芯开始向右移动，涡流空泡区域 A 迅速增大，B 和 C 消失；在 1.15、2.40 ms 时刻，锥阀阀芯往复运动(振动)，涡流空泡区域 A 逐渐减小；在 3.15 ms 时刻，锥阀阀芯向右移动达到最大值，这时涡流空泡区域 A 迅速增大；随后迅速减小，整个过程结束。出现以上现象的原因是：锥阀阀芯在回位弹簧的作用下向左移动，随着阀芯位移的增大，开口度增大，通过锥阀的流量增大，使流体下游区域压力迅速降低，形成多个空化气泡群；随着下游区域流体增加，压力增大，空泡溃灭，空泡泡群减小；当阀芯向右移动时，开口度减小，通过阀口的流速增大，也会产生大量的空化气泡。

图 10 为锥阀区域流场在回油过程中柴油流线变化。由图中可知，在 0.05 ms 时刻，经过锥阀阀口 a 处(图 9a)的柴油流线首先依附在锥阀阀芯上，离开阀口 b 处(图 9a)后，又依附到锥阀座斜面上，经过锥阀座斜面后，不再依附锥阀阀芯和锥阀座表面，

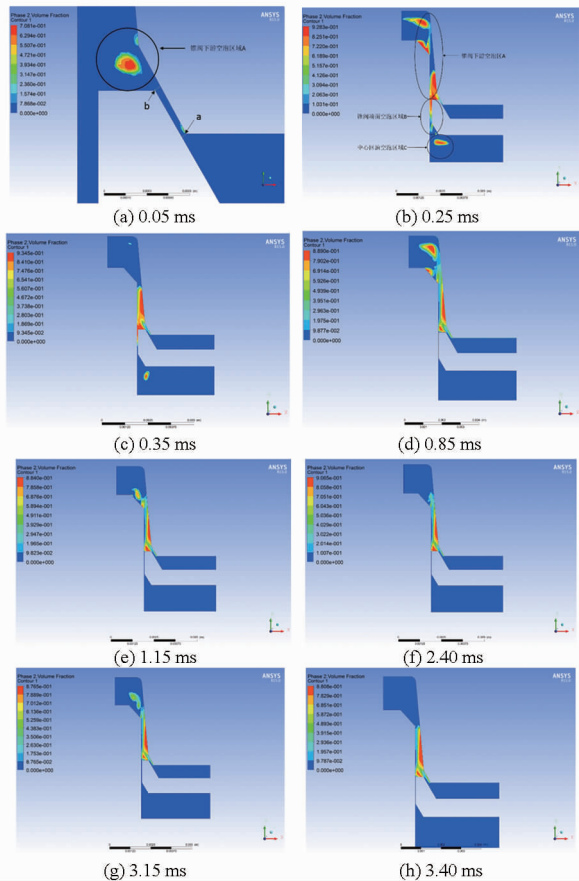


图9 柴油蒸汽相体积分数云图变化

Fig. 9 Contours of volume fraction changes of diesel vapor phase

这样形成了一个涡流区域;在 0.25 ms 时刻,随着锥阀阀芯升程的增大,柴油流线离开锥阀座斜面后又依附在锥阀座拐角面上,形成了多个涡流区域,如图 9b 所示。在 0.35 ms 时刻,随着锥阀阀芯向左移动,经过锥阀座斜面后的流线依附到玻璃端面上,然后在玻璃端面倒角处分离,不再依附到锥阀座上,这样在锥阀下游区域形成了一个相对比较大的涡流区域,如图 9c 所示。图 10d~10h 分别显示了不同时刻对应的流线依附情况。上述分析结果说明:经过锥阀的流体由于到阀口位置横截面的突变,流速和压力变化很大,过阀口处时出现流体主流与壁面脱离现象,并产生涡流。随着阀芯的往复运动,阀口处

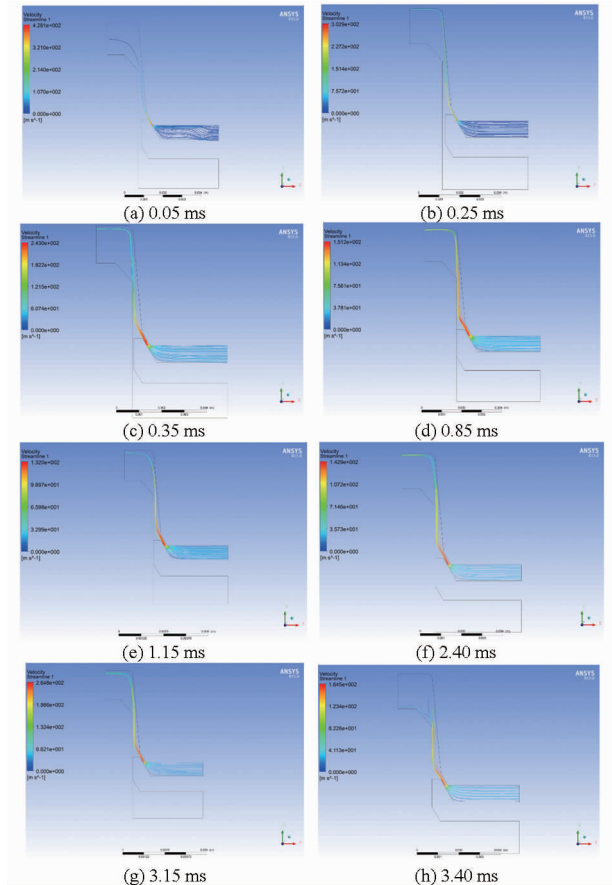


图10 柴油流线云图变化

Fig. 10 Contours of changes of diesel streamline

横截面不断变化,从而出现流体主流与玻璃端面 and 锥阀座拐角壁面不断脱壁、附壁的现象,使涡流区不断变化。

#### 4 结论

(1) 电控单体泵在回油过程中,锥阀下游区域发生空化现象,空化泡群随着凸轮转速的增加,平均空化周期时间逐渐减小,波动不明显,平均亮度逐渐增强。

(2) 通过对电控单体泵锥阀区域瞬态流场仿真分析认为,锥阀阀芯的往复运动造成阀口横截面不断变化,使电控单体泵锥阀下游产生的空化泡群和涡流区域不断变化。

#### 参 考 文 献

- 1 VAN LOOKEREN CAMPAGNE C, NICODEMUS R, DE BRUIN G L, et al. A method for pressure calculation in ball valves containing bubbles[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 765 - 771.
- 2 WASHIO S, TAKAHASHI S, MURAKAMI K, et al. Cavity generation by accelerated relative motions between solid walls contacting in liquid[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2008, 222(9): 1447 - 1461.
- 3 WASHIO S, TAKAHASHI S, YOSHIMORI S. Study of cavitation starting at the point separation on a smoothwall in hydraulic oil flow[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2003, 217(6): 619 - 630.
- 4 WASHIO S, KIKUI S, TAKAHASHI S. Nucleation and subsequent cavitation in a hydraulic oil poppet valve[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2010, 224(4): 947 - 958.
- 5 李光飞, 刘恒龙, 邓斌, 等. 液动力对锥阀振动特性的影响[J]. 机床与液压, 2014, 42(5): 28 - 30.  
LI Guangfei, LIU Henglong, DENG Bin, et al. Effect of flow force to the poppet valve vibration[J]. Machine Tool & Hydraulics,

- 2014, 42(5):28-30. (in Chinese)
- 6 YI Dayun, LU Liang, ZOU Jun, et al. Interactions between poppet vibration and cavitation in relief valve [J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2014, 229(8):1447-1461.
  - 7 郑淑娟, 权龙. 锥台形液压锥阀过流面积 CFD 可视化计算 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(4):327-333.  
ZHENG Shujuan, QUAN Long. CFD visual analysis on cross section of truncated poppet valve [J]. *Transactions of the Chinese for Agricultural Machinery*, 2014, 45(4):327-333. (in Chinese)
  - 8 栾健, 王强, 何晓晖, 等. 基于动网格的液压锥阀动态特性研究 [J]. *液压与气动*, 2015(7):103-106.  
LUAN Jian, WANG Qiang, HE Xiaohui, et al. Research on transient properties of hydraulic poppet valve with dynamic mesh [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2015(7):103-106. (in Chinese)
  - 9 吕少恒. 基于热效应的锥阀振动特性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.  
LÜ Shaoheng. The research on poppet valve vibration based on thermal effects [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
  - 10 GAO Hong, FU Xin, YANG Huayong. Numerical and experimental investigation of cavitation flow hydraulic poppet valve [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(8):27-30.
  - 11 张敏弟, 宋晓峰, 王国玉, 等. 空化流动图像处理程序设计及其应用 [J]. *北京理工大学学报*, 2006, 26(11):983-986.  
ZHANG Mindi, SONG Xiaofeng, WANG Guoyu, et al. Design and application of cavitation flow image programs [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2006, 26(11):983-986. (in Chinese)
  - 12 郑淑娟. 插装型锥阀配合副流固热耦合分析及流场可视化 [D]. 太原: 太原理工大学, 2015.  
ZHENG Shujuan. Liquid-solid-thermal coupling analysis and flow visualization of the cartridge poppet valve [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015. (in Chinese)
  - 13 ASOK S P, SANKARANARAYANASAMY K T, SUNDARAJAN T, et al. Effect of labyrinth cavities on cavitation reduction in conical valve [J]. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 2008, 35(5):395-416.
  - 14 SOU A, HOSOKAWA S, TOMIYAMA A. Effects of cavitation in a nozzle on liquid jet atomization [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(17):3575-3582.
  - 15 LINDAU J W, KUNZ R F, BOGER D A, et al. High Reynolds number unsteady multiphase CFD modeling of cavitating flows [J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2002, 124(3):607-616.
  - 16 PAYRI F, PAYRI R, SALVADOR F J, et al. A contribution to the understanding of cavitation effects in diesel injector nozzles through a combined experimental and computational investigation [J]. *Computers & Fluids*, 2012, 58:88-101.