doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.053

多孔孔板水力空化可视化与数值模拟

何志霞[1,2]　陈驭航[1]　纪长浩[1]

(1.江苏大学能源与动力工程学院,镇江 212013;2.江苏大学能源研究院,镇江 212013)

摘要:基于自行搭建的多孔孔板空化反应装置,采用高速数码摄影和长工作距离显微成像技术,对多孔孔板中心孔内和孔板末下游进行空化特性试验研究,并分析了入口压力、空化数等参数对孔板水力空化的影响。试验结果显示:随着入口压力升高,孔内空化数不断下降且开始产生空化。孔板内和孔板下游都有空化区存在,且孔内空化对下游空化区影响大。数值模拟结果显示孔内空化与试验相符合,且下游空化区的产生是由孔内空化云脱落至下游漩涡区引起的。

关键词:多孔孔板;空化;可视化;数值模拟

中图分类号:TV131　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2016)02-0396-06

Visualization and Numerical Simulation of Hydrodynamic Cavitation in Multi-hole Orifice Plate

He Zhixia[1,2]　Chen Yuhang[1]　Ji Changhao[1]

(1. *School of Energy and Power Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*

2. *Institute for Energy Research*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: The multi-hole orifice plate is a simple hydrodynamic device which can be used for intensification of liquid-liquid heterogeneous micromixing for preparing biodiesel or emulsified diesel. A flow visualization experiment system with transparent hydrodynamic cavitation reactor was set up to investigate the cavitation in the orifice plate and the outlet of the orifice plate. The effects of upstream pressure and cavitation number on the change of hydrodynamic cavitation were investigated. As the cavitation in orifice plates is transient, the numerical simulation was combined to give a more detailed flow insight and predict the cavitation inception and development. SST and LES models were used to simulate the cavitating flow in orifice plates. The experimental results showed that with the increase of upstream pressure the cavitation incepted in the orifice plate, and the discharge coefficient increased at first. In the next stage, cavitation extended to the outlet of the testing orifice plate with the decrease of discharge coefficient which was caused by cavitation choking flow. Also from the experimental images, it was concluded that some cavity bubbles merged into large-scale bubbles and existed in the downstream region of the orifice plate which seemed to cause the choking flow. Compared the numerical simulation results with the experimental results measured by high speed camera, it was found that SST model can predict the average length of cavitation but it can hardly simulate the transient cavitating flow. LES model can well predict the cloud cavitation and the re-entrant jet which is central to the process of cloud cavitation shedding. The results also showed that with the development and collapse of cloud cavitation, the length of cavity changed periodically. In addition, the detatils of the re-entrant jet were shown in LES simulation.

Key words: multi-hole orifice plate; cavitation; visualization; numerical simulation

收稿日期:2015-07-22　修回日期:2015-09-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51176066、51276084)

作者简介:何志霞(1976—),女,教授,博士生导师,主要从事柴油机喷嘴内部空化流动研究,E-mail:zxhe@ujs.edu.cn

引言

空化是一种非常复杂的流体动力学现象，利用其溃灭同时会产生瞬时高温高压及强烈的冲击波及微射流[1]，有望起到增加非均相液体混合效果和强化传质传热的效果。

针对这一特性，将空化效应应用于制备生物柴油、乳化柴油等领域[2-4]。多孔孔板水力空化技术则由于其装置简单、能源环保等优点成为一大研究热点。国内外针对多孔孔板结构如开孔率、孔板厚度、开孔形状的实验和数值模拟计算研究较多[5-9]。文献[10]针对多孔孔板进行阻力系数分析并且对孔板下游进行拍摄，使用 Matlab 处理图片灰度来表征空化的强度，但对于孔板孔内和孔出口下游的空化区研究较少。

高速流体通过多孔孔板时，由于孔内压力的下降而产生空化，并在孔内末端和下游压力恢复区溃灭并产生微射流和强烈的压力波动从而达到强化非均相液体混合等作用，且通过多孔孔板的射流受到空化作用后互相掺混，形成剪切湍流，在管壁附近产生回流漩涡等一系列复杂流场[11-12]。因此，研究多孔孔板的水力特性和空化特性有助于了解孔板反应器空化特性，对空化器设计和工作有重要指导意义。

本文采用高速数码摄影对多孔孔板中心孔和孔板下游进行空化拍摄试验并且进行空化区的数值模拟计算，研究入口压力对孔板空化和流场的影响，并揭示下游产生空化区的原因。

1　试验装置搭建和数值计算模型建立

1.1　试验台装置

本试验在自行搭建的水力空化可视化装置上进行，示意图如图 1 所示。

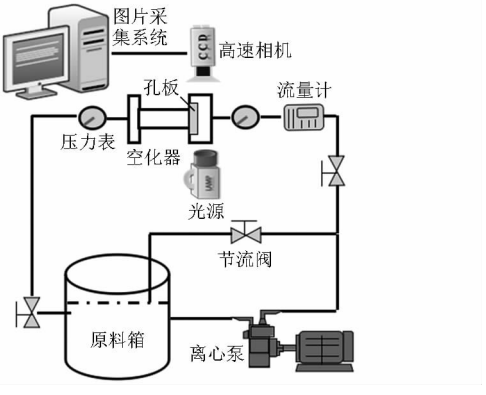


图 1　试验台装置示意图

Fig. 1　Schematic of experiment apparatus

试验台主要由多孔孔板空化反应器、循环管路系统和图像采集系统组成。其中，空化反应器和孔板皆采用透明有机玻璃制成，并用法兰连接上下游管路，孔板采用嵌入法兰盘中的方法与空化反应器连接。由多级离心泵作为动力循环装置，通过回流阀和支路阀门来调节孔板前压力及流量，以此来开展多孔孔板空化反应器的水力特性和空化可视化的试验研究。

试验台采用高速数码摄像机和长工作距离显微成像技术进行图像采集，采用高强度冷光源背部打光。显微镜头为美国 QUESTAR 公司生产的 QM－1 型长工作距离显微镜头，工作距离为 56 ~ 140 cm。试验时对装载在空化反应器法兰盘中的孔板中心孔和孔下游进行拍摄，图 2 为孔板空化反应器拍摄区域示意图。本试验流体介质和研究孔板的主要工作参数如表 1 所示。

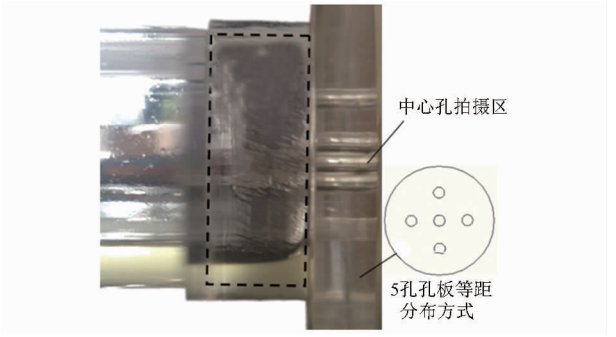


图 2　拍摄区域示意图

Fig. 2　Schematic of visualization region

表 1　主要试验参数

Tab. 1　Main operating parameters

参数	数值
流体介质	0 号柴油
工作温度/℃	30
流体粘度/(mPa·s)	3.1
流体密度/(kg·m^{-3})	830
饱和蒸汽压/kPa	1.65
开孔直径/mm	2
孔板厚度/mm	5
开孔率	0.032
孔板开孔数目	5
高速像机拍摄速度/(帧·s^{-1})	10 000
高速相机快门速度/ms	0.01

1.2　数值计算模型

以可视化试验为主，数值模拟为辅，两者结合分析孔内和孔下游空化区流场特性。使用 CFD 软件 ANSYS Fluent 15.0 对多孔孔板空化区和流场进行计算分析。由于多孔孔板的流场情况较为复杂，这就要求选用能对漩涡和射流、剪切层等流场计算效果好的湍流模型。选用 SST(剪切应力模型) $k-\omega$ 模型[13-19]，其不但在近壁区及回流漩涡有很好的预测效果，而且同样适用于高雷诺数流动区域的预测，

方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+G_k-Y_k+S_k \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right)+G_\omega-Y_\omega+D_\omega+S_\omega \tag{2}$$

式中 Γ_k、Γ_ω——k、ω 的扩散率

Y_k、G_ω——k、ω 的扩散而产生的湍流

k——湍流动能 ω——湍流频率

SST 非定常模拟结果能预测平均流场结果，但是对空化的瞬态特性、空化云脱落等效果不能很好模拟，故利用 SST 模型计算结果作为大涡模拟(LES)计算初始流场，模拟空化特性，进而结合可视化图片进行分析。选择多相流模型中的 Mixture 模型和 Schnerr and Sauer 空化模型，其对模拟孔内空化有较好适用性。气泡生长和溃灭过程通过 Rayleigh－Plesset 方程进行计算，方程为

$$R_e=\frac{\rho_v\rho_l}{\rho}\alpha(1-\alpha)\frac{3}{R_B}\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_V-p}{\rho_l}}\quad(p_V\geqslant p) \tag{3}$$

$$R_c=\frac{\rho_v\rho_l}{\rho}\alpha(1-\alpha)\frac{3}{R_B}\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p-p_V}{\rho_l}}\quad(p_V\leqslant p) \tag{4}$$

式中 p_V——饱和蒸汽压 R_B——气泡半径

α——气体体积分数

R_e、R_c——气泡生长和溃灭速度

ρ_v、ρ_l——气泡和液体密度

液相的参数设置(表 1)，气相选择柴油气体，默认设置气核数密度为 1×10^{15}，柴油气体密度为 0.029 kg/m^3。离散方程均采用基于内节点的有限容积法，对压力场的修正采用 SIMPLE 算法，动量相和连续相等差分均采用 QUICK 格式，由于经过孔板时将会产生大的压力降，压力差分采用 PRESTO! 格式。边界条件设置进口为压力进口，0.1～0.36 MPa，出口为压力出口，环境压力与试验条件相同保持 0.1 MPa 一个大气压，压强均用表压力表示。采用简化模型，对孔板抽取流道，孔板上游 15 mm 管道，下游 100 mm 管道。采用六面体结构网格划分 3 维模型，并且针对孔板孔和孔下游加密网格，结合网格无关性分析，确定网格数为 120 万，保持边界 Y＋约为 1。孔径为 2 mm 的 5 孔孔板反应器计算区域网格如图 3 所示。

2 计算结果

2.1 计算模型的验证

选用 Fluent 15.0 软件中的混合多相流模型，采用相同尺寸的多孔孔板和介质进行数值模拟与试验的质量流量对比。图 4 为质量流量与上游压力的试验值和模拟值。

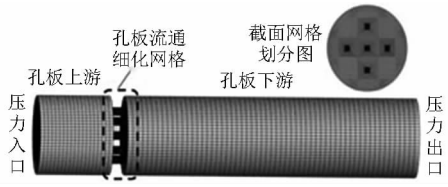


图 3 孔板反应器计算网格

Fig. 3 Computational mesh of reactor

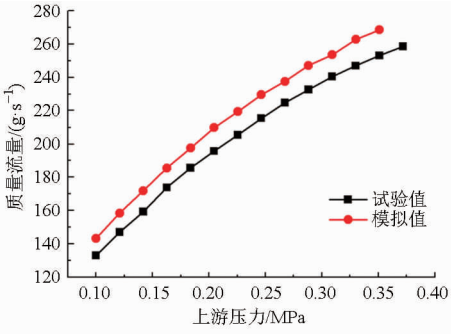


图 4 质量流量试验和模拟值

Fig. 4 Experiment and simulation results of mass flow rate

2.2 孔板空化发展过程可视化及数值模拟

孔板上游压力 p_i 的增加能导致流量和流速的上升，流体经过孔板在孔内流速提升且产生压降，以致产生空化，且在孔内后半段和孔出口下游压力恢复区受到相对高压而溃灭。而空化数 C_v 和流量系数 C_d 作为一个无量纲常数则可以在一定程度上评价空化流动流通程度，即

$$C_v=\frac{p_0-p_V}{0.5\rho v^2} \tag{5}$$

$$C_d=\frac{q_m}{A\sqrt{2\rho\Delta p}} \tag{6}$$

式中 p_0——孔板下游恢复压力，Pa

v——孔的平均流速，m/s

ρ——柴油密度，kg/m^3

Δp——上下游压差，Pa

对孔板中心孔进行可视化试验及数值模拟，图 5 为试验所测上游压力 p_i 与孔板流量系数 C_d 和空化数 C_v 的关系。由图 5 可知，空化数 C_v 随上游入口压力增大而呈下降的趋势，且在压力增加初期下降明显，大概在 0.19 MPa 空化数为 1.12 时空穴初生，随着入口压力持续增大，空穴发展并最终延伸至孔板末端成超空化。且在后期空化数下降速度渐缓。理论上，空化数越小，则空化效果越好，空化在略大于 1 时初生，可能与流体中含有细微杂质，而导致空化核增多，初生提前。流量系数在压力提升初期基本保持在 0.66 附近，当空穴初生后，由于产生

的微小气泡对液体产生可压缩性，并且在壁面附着薄薄的空化区，大大减小了流体与管壁之间的阻力，所以流量系数在空化发展期有个上升过程，且在此孔板条件下，约在 0.26 MPa 得到最大流量系数 0.673。

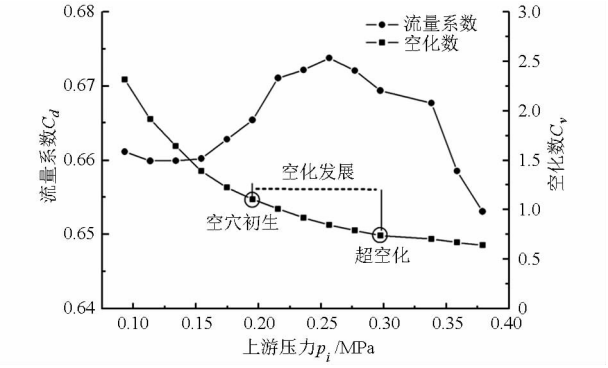


图 5　试验流量系数和空化数

Fig. 5　Discharge coefficient and cavitation number under different upstream pressures

随着空化发展至超空化后，由于空化区域增大，孔板孔内充满空化区域，由于在孔板出口处空化并没有完全溃灭，导致大量未溃灭的空化气泡在下游出口聚合合并，这也能在图 6 中很好反映，孔板下游区域，随着上游压力的上升，渐渐产生一些聚合合并气泡，且当上游压力超过 0.26 MPa 后，下游回旋气泡大量聚集，表现为下游区域呈现灰度值不断上升，即气泡增加。由于孔板出口射流间和射流与管壁间漩涡区域对空泡产生卷吸作用，大量气泡停留回旋在下游处，导致下游产生气阻塞流。气阻塞流相当于减小了下游的流通面积，且大大增加了流通阻力，所以流量系数急速下降。流量系数的下降，对应用水力空化效应的空化器有非常大的抑制作用，所以针对水力空化，需在一个流量系数较高和空化发展较好的工况下运转，本文所选孔板条件下，最佳上游压力约为 0.26 ~ 0.3 MPa，即为空化发展到超空化阶段之间。

针对孔板中心孔内空化初生发展到超空化和孔板出口下游的空化区域进行了可视化拍摄和数值模拟，表 2 为对比表，其中黑色部分表示空化区域，白色区域为流体。由图可知，随着上游压力 p_i 增加，试验和模拟的孔内空化区域从空化初生至空化发展以至超空化发展延伸到出口处。结合试验拍摄和数值模拟可知，空化初始产生于孔板孔入口拐角处，然后沿着轴向孔壁发展，产生片状空化。随着入口压力进一步加强，空化数下降，空化发展越来越剧烈，产生气阻塞流，空泡一直延伸到孔出口处。但是模拟所得空化区相比于同工况试验空化区短，除了数值模拟本身存在的误差和试验误差，主要是由于空化云的脱落和一些小气泡在孔后半段还未溃灭而汇聚，并且随着高速流体向下游移动，而高速数码拍摄的是极短时间内空化泡位移叠加图，所以试验图片空化区域要长。

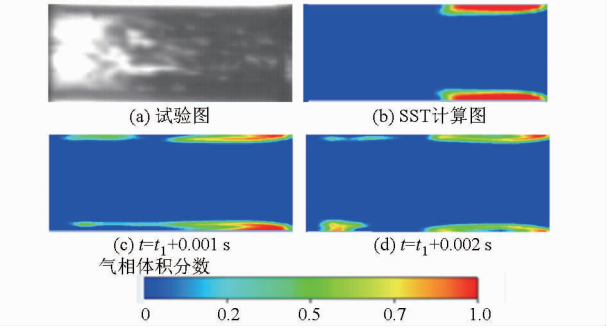


图 6　空化脱落对比

Fig. 6　Comparison of experiment and numerical simulation about shedding of cloud cavitation

此外，可视化试验发现孔板出口下游也存在空泡区域，这与数值模拟不同，数值模拟并未在下游产生空化。由此可知试验拍摄下游“空泡区”并非为压力低于饱和蒸汽压而产生的空化，原因主要为孔板内产生的空化云脱落和小气泡在孔板出口下游并没有溃灭完全，小气泡汇聚成大气泡后在下游射流与壁面形成的漩涡相对压力较低处得以存在。所以试验时能清楚观察到孔板下游有大量回旋气泡。水力空化装置主要利用空化溃灭产生的机械能和化学能，所以针对未溃灭的气泡，应该略增加背压以使空泡溃灭更加完全。

2.3　空泡脱落数值模拟

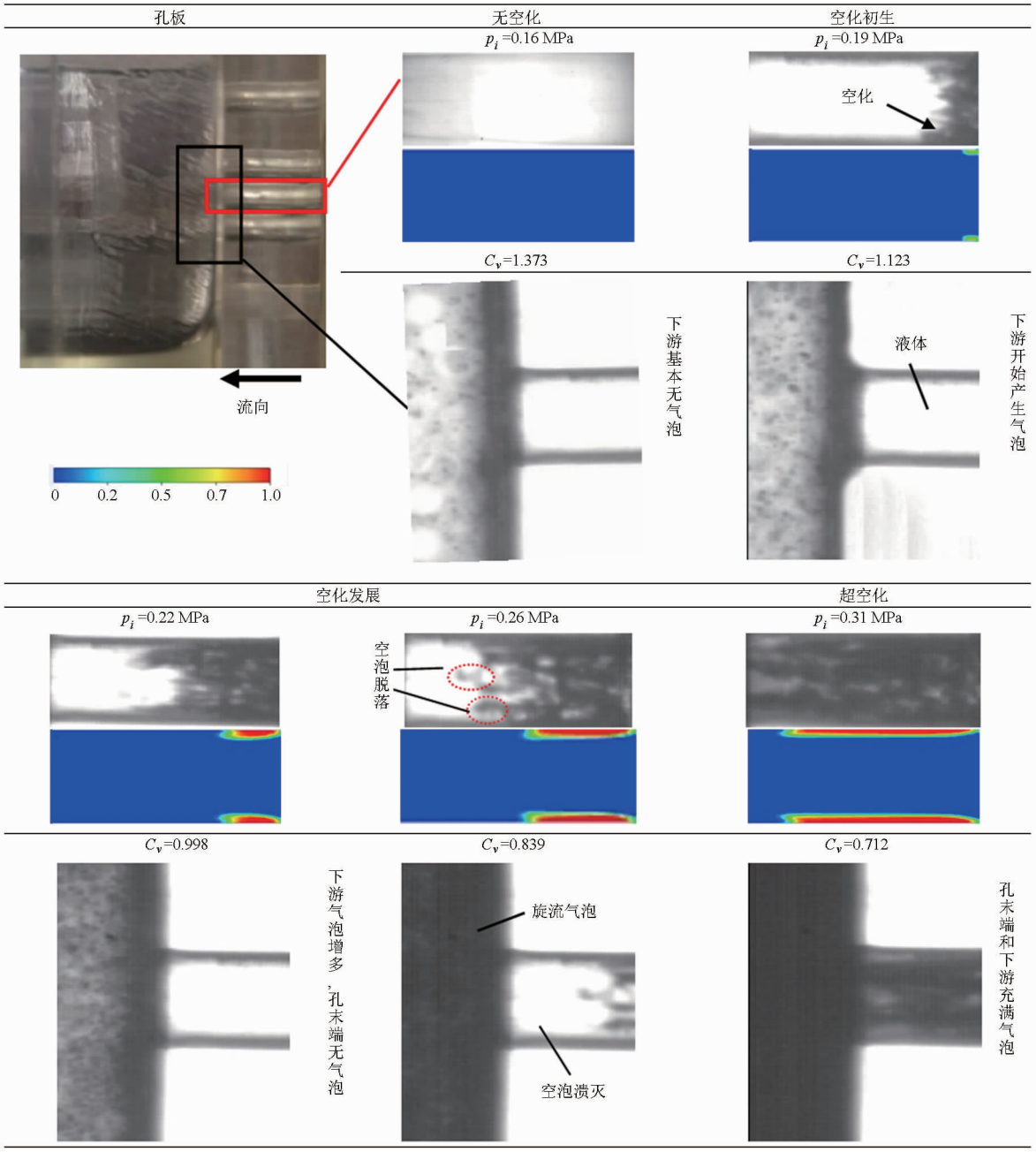
采用 SST 模拟，能较好地反映水力空化孔板空化区和流场分布，但是对于空化云的脱落等瞬态现象则不能很好模拟，这就需采用更为精确的湍流模型 LES 来预测空化流动特性。

图 6 分别为大涡模拟下的某 2 个间隔时间为 1 ms 的空泡脱落图和试验、SST 模型下空化对比图。采用 SST 计算结果作为 LES 初值计算，选用上游压力 p_i = 0.26 MPa 工况模拟。由图可知，LES 能定性的模拟出空泡脱落的状态，这主要是在空泡腔尾部闭合产生回射流导致孔壁面的空化扭曲变形，脱落成为空化云，并且随着流动朝下游出口流动，在压力回复区渐渐破碎溃灭。且回射流从空泡底部向孔板进口流动，与主流方向相反，速度矢量图如图 7 所示，可以看到速度矢量箭头方向与主流相反区域即为回射流。

所以 LES 模拟能更好地预测瞬时空化特性，并且说明在孔板中空化也存在准周期性脱落现象，而这些脱落的空化云一部分在压力回复区溃灭，另一部分还未溃灭的小气泡团在下游射流间，壁面漩涡

表 2 可视化试验和数值模拟空化区

Tab. 2 Visualized experiment and numerical simulation cavitation region



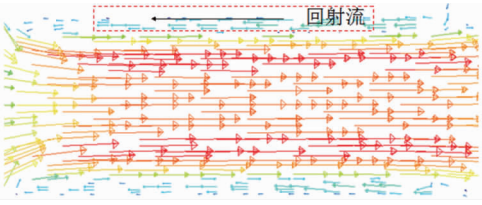


图 7 壁面回射流

Fig. 7 Re-entrant jet in near wall

间汇聚合并，导致下游也存在大量回旋气泡流。

3 结论

(1)随着上游压力升高，流量增大，孔内空化数不断下降并开始产生空化，初生空化数 C_{vi} 为 1.12 超空化 C_v 为 0.712。流量系数随着空穴初生，有一个上升过程，在超空化阶段以后急速下降。所以结合空化发展情况和流量系数，应选取空化发展与超空化之间为最佳水力空化效果工况。

(2)SST 模拟能预测平均空化特性，与试验图较为符合，且下游空化区由孔板孔内空化脱落和未溃灭小气泡汇聚于下游漩涡区而成。

(3)LES 大涡模拟能更好地预测瞬时空化流动特性，能定性模拟出空泡脱落情况，这是由于壁面二次回流导致空化云扭曲变形而最终脱落。

参 考 文 献

1 Gogate P R. Cavitation: an auxiliary technique in wastewater treatment schemes [J]. Advances in Environmental Research, 2002, 6(3):335 – 358.

2 王惠敏, 孙三祥. 水力空化及其研究现状 [J]. 甘肃科技, 2005,21(12): 150 – 151.
Wang Huiming, Sun Sanxiang. Research advances of hydrodynamic cavitation [J]. Gansu Science and Technology, 2005,21(12): 150 – 151. (in Chinese)

3 Saharan V K, Pandit A B, Satish Kumar P S, et al. Hydrodynamic cavitation as an advanced oxidation technique for the degradation of Acid Red 88 dye [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012,51(4): 1981 – 1989.

4 Pradhan A A, Gogate P R. Removal of p-nitrophenol using hydrodynamic cavitation and Fenton chemistry at pilotscale operation [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 156(1): 77 – 82.

5 Maynes D, Holt G J, Blotter J. Cavitation inception and head loss due to liquid flow through perforated plates of varying thickness [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2013,135(3):031302 – 031302 – 11.

6 Patil P N, Gogate P R. Degradation of methyl parathion using hydrodynamic cavitation: effect of operating parameters and intensification using additives [J]. Separation and Purification Technology, 2012,95:172 – 179.

7 Fratino U, Pagano A, Malavasi S, et al. Pressure drop and recovery across sharp-edged multi-hole orifices[C]// Proceedings of the 2nd IAHR Europe Conference, 2012.

8 杨永刚. 方形孔口多孔板水力空化反应器的试验研究与数值模拟 [D]. 杭州: 浙江工业大学,2012.
Yang Yonggang. Experiment stduy and numerical simulation of hydrodynamic cavitation reactor with multi-square-hole orifice plates [D]. Hangzhou:Zhejiang University of Technology, 2012. (in Chinese)

9 杨永刚, 董志勇,陈圻圻,等. 方形孔口多孔板水力空化反应器的初步研究 [C]//第五届全国水力学与水利信息学大会论文集, 2011: 406 – 411.
Yang Yonggang, Dong Zhiyong, Chen Qiqi, et al. Preliminary study of hydrodynamic cavitation reactor with multi-square-hole orifice plates [C]//5th Progress of Hydraulics and Water Conservancy Information, 2011:406 – 411. (in Chinese)

10 余冬梅,卢晓江,李靖. 多孔孔板水力空化装置的阻力特性研究 [J]. 轻工机械,2010, 28(1): 17 – 22.
Yu Dongmei, Lu Xiaojiang, Li Jing. Research on resistance characteristics of multi-hole orifice plate in hydraulic cavitation [J]. Light Industry Machinery, 2010, 28(1): 17 – 22. (in Chinese)

11 Gogate P R, Pandit A B. Hydrodynamic cavitations reactors: a state of the art review [J]. Divisions of Chemical Engineering, 2001,17(1):1 – 85.

12 袁士豪,殷晨波,叶仪,等. 异形分压阀口节流槽节流特性研究[J]. 农业机械学报,2014,45(1):321 – 327.
Yuan S H, Yin C B, Ye Y, et al. Studies on the throttling performance of non-circumferential throttling port[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(1): 321 – 327. (in Chinese)

13 冀宏,王东升,刘小平,等. 滑阀节流槽阀口的流量控制特性 [J]. 农业机械学报,2009,40(1): 198 – 202.
Ji Hong, Wang Dongsheng, Liu Xiaoping, et al. Flow control characteristic of the orifice in spool valve with notches [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(1): 198 – 202. (in Chinese)

14 于洪仕,张涛,赵珊珊,等. 多孔孔板流量计流场仿真 [J]. 天津大学学报, 2014, 47(1): 61 – 66.
Yu Hongshi, Zhang Tao, Zhao Shanshan, et al. Simulation of the flow field of multi-hole orifice flow meter [J]. Journal of Tianjin University, 2014, 47(1): 61 – 66. (in Chinese)

15 李彦梅, 徐英, 张立伟, 等. 上游单弯头对内锥流量计性能影响的仿真与实验研究 [J]. 仪器仪表学报, 2009,30(6): 1195 – 1201.
Li Yanmei, Xu Ying, Zhang Liwei, et al. Simulation and experiment investigation on effect of upstream pipe single elbow on the performance characteristics of V-cone flowmeters [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009,30(6): 1195 – 1201. (in Chinese)

16 郑淑娟,刘楷安,孙雪丽. 基于 CFD 的液压锥阀内部流场的数值模拟分析[J]. 华北水利水电学院学报,2008, 29(2): 56 – 58.
Zheng Shujuan,Liu Kaian,Sun Xueli. Numerical simulation of the flow field inside the hydraulic poppet valve based on CFD [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power,2008,29(2): 56 – 58. (in Chinese)

17 Chen Y, Lu C, Wu L. Modelling and computation of unsteady turbulent cavitation flows[J]. J Hydrodyn Ser B, 2006, 18:559 – 566.

18 Nouri N M, Mirsaeedi S M H, Moghimi M. Large eddy simulation of natural cavitating flows in venturi-type sections[J]. J. Mech. Eng. Sci., 2011,225:369 – 381.

19 Goncalves E. Numerical study of unsteady turbulent cavitating flows[J]. Eur. J. Mech. B Fluid, 2011,30:26 – 40.