

# 文丘里管汽蚀实验研究

唐 虎<sup>1</sup>, 毕勤成<sup>2</sup>

(1 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100;

2 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘 要:** 设计了 4 种不同喉部尺寸的文丘里管, 各文丘里管进行了不同入口压力、相同出口压力下的实验, 对其中 1 种进行了不同温度下的实验, 结果表明: 随着入口压力的提高, 文丘里管的流量系数呈缓慢下降趋势; 水温达到某一值时, 流量系数出现明显减小; 在相同入口、出口压力下, 喉部直径越大, 汽蚀区越明显; 入口压力越大, 汽蚀区越明显; 对水在一定温度范围内加温, 汽蚀区没有明显变化; 此外, 实验中文丘里管汽蚀区呈现周期性变化。最后对其中 1 种文丘里管进行了数值模拟, 试验中汽蚀区长度与计算值基本一致。

**关键词:** 文丘里管; 汽蚀; 实验研究

**中图分类号:** V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 05-0054-07

## Experimental study of cavitation in venturi

TANG Hu<sup>1</sup>, BI Qincheng<sup>2</sup>

(1. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering,  
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Four venturi tubes with different throat diameter were designed. Each venturi was tested at different inlet pressure and same outlet pressure. Heating experiment for a selected venturi was carried out at different temperature. The experimental results show that the venturi flow coefficient has a trend of slow decline with the increase of inlet pressure; the flow coefficient decreases quickly when water temperature reached a certain value; at same inlet pressure and outlet pressure, the larger the throat diameter is, the greater the cavitation area becomes; the higher the inlet pressure is, the greater the cavitation area; when water is heated in certain temperature range, the cavitation area doesn't vary remarkably. In addition, the cavitation area of venturi presented periodic variation during the experiment. The numerical simulation for flow field of a selected venturi was carried out, and the results were compared with those of the experiment. The results show that the calculated cavitation length is almost the same with the experimental one.

**Keywords:** venturi; cavitation; experimental study

收稿日期: 2015-01-31; 修回日期: 2015-03-26

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2011JY09)

作者简介: 唐虎 (1977—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机系统设计

## 0 引言

19世纪后半叶,随着蒸汽轮机的应用,在动力系统中逐渐出现了“汽蚀”(也称为空化)现象。随着科技的进步,涉及汽蚀现象的领域愈来愈多,许多研究者对此进行了广泛的研究。到目前为止,有关汽蚀研究最多的装置之一是文丘里管。研究主要包括实验研究、数值模拟(有的包含实验研究)、应用研究等。

### 1) 实验研究

有的对不同结构文丘里管进行实验研究, Sayyaadi 等对串联汽蚀文丘里管反应器与传统的单文丘里管反应器进行了实验比较<sup>[1]</sup>。Fasih 等对3种不同结构尺寸的文丘里管空化进行了实验比较,结果显示如果文丘里管出口压力与入口压力之比小于0.8,则流量恒定且与下游压力无关;当该值超过0.8时,文丘里管就等同于节流孔板<sup>[2]</sup>。

有的对特定流体介质进行实验研究, Ardiansyah 等对钠在文丘里管内流动时的空化和空蚀特性进行了实验研究,实验表明不同的滞止压力和温度,开始的空化数都基本是一致的,但在空蚀实验中,空化数在0.59到0.51间发生变化<sup>[3]</sup>。

随着技术发展,对文丘里管的实验研究也越来越深入。Vabre 等利用同步加速器 X 射线成像进行了文丘里管结构汽蚀流动研究,该技术能以数千赫兹的频率同时测量液态相和气态相的速度场<sup>[4]</sup>; Coutier-Delgosha 等采用超快 X 射线成像技术进行了文丘里管空化流的速度场测<sup>[5]</sup>。Sayyaadi 等还对文丘里管反应器进行了空化不稳定性研究,采用高速摄像机观察到了文丘里管空化流的波动过程,采用示波器记录了波动的频率,实验发现空化数是波动特性的主要影响因素<sup>[6]</sup>。

### 2) 数值模拟

文丘里管汽蚀仿真研究主要是随着计算流体力学的发展而发展的。但数值计算的湍流模型及汽蚀模型还不能完全准确的描述实际的流动状态,采用不同的模型时计算的结果会存在差别,流动状态不一致时,有的模型计算结果与实际较为吻合,有的差别明显。因此,通常的计算都需要用实验进行验证。另外,影响汽蚀的因素众

多,数值模拟的侧重点也多不一致。为了验证模拟的正确性,许多数值模拟都先采用实验数据进行了检验。

有的重点对不同介质进行数值模拟。到目前为止,绝大部分的数值模拟都是采用水为介质,少数采用别的介质。Ardiansyah 等对钠和水的汽蚀特性进行了数值模拟比较,结果显示在相同的空化数和不凝性气体含量情况下,水和钠中的空泡分布没有大的差别<sup>[7]</sup>;浙江大学的张小斌等考虑汽蚀过程热效应并假设气相与液相间热平衡,利用计算流体力学方法对液氧文丘里管的汽蚀特性进行了分析<sup>[8]</sup>;史刚和梁国柱,针对  $N_2O$  的特点,对3种不同工况下文氏管的汽蚀流场分别考虑汽化热和不考虑汽化热进行了仿真,并对2种计算结果进行了对比分析<sup>[9]</sup>。

有的重点对不同的模型进行数值模拟, Dittakavi 等采用大涡模型模拟了文丘里管里湍流-汽蚀的相互作用<sup>[10-11]</sup>; De Giorgi 等采用不同的模型对液体火箭发动机低温流体在文丘里管的汽蚀进行计算比较,其中全汽蚀模型受到了更多关注<sup>[12]</sup>; Goncalves Eric 等对空化流的不同数值求解器进行了计算比较,结果认为可压缩性很有必要<sup>[13]</sup>;谭建国、刘景华和王振国通过综合采用数值计算、实验验证、系统辨识的方法,建立了一种适用于系统仿真的四阶文丘里管动态模型,计算表明:即使在汽蚀状态下,文丘里管也可能出现3.3%的流量波动<sup>[14]</sup>。

有的重点对不同的文丘里管结构参数进行数值模拟, Bashir 等基于 CFD 对狭缝文丘里管不同结构参数下的空化进行了模拟,得到了当喉部长度与高度相等且扩张半角为  $5.5^\circ$  时达到最佳空化<sup>[15]</sup>。

有的重点对汽蚀不稳定性进行模拟, Goncalvs Eric 等对文丘里管汽蚀流动的不稳定性进行数值模拟,并与实验数据进行了对比,结果表明湍流模型有着重要的影响<sup>[16]</sup>。

### 3) 应用研究

文丘里管发生汽蚀时,在入口条件保持不变的情况下,流量基本保持恒定,因此,可以用作流量测量装置。在文丘里管下游,汽泡在较高压

力作用下会发生溃灭, 溃灭将产生一些特殊的效应, 利用这些特殊效应, 可以用于污水处理等方面。为此, 有的学者进行了相关的研究工作。

Kim H J等研究了文丘里管进行污水预处理来增加生物降解的性能, 研究得出文丘里管出口角度为  $12^\circ$  时性能较高<sup>[17]</sup>; Saharan 等采用水力空化进行活性红色 120 染料的降解研究, 结果发现红色 120 染料的降解与溶液的 PH 值有关, 在酸性溶液中可以获得更高的降解率,  $H_2O_2$  的添加可以强化降解率<sup>[18]</sup>; Sainte Beuve 等采用水力空化进行菜籽油的酶水解实验, 实验中文丘里管入口压力增加 8 bar 时, 多脂肪酸的产量最多也只能达到 60%, 而采用简单的搅拌炉反应器可以达到 90% 或者更多, 这说明空化在某些方面抑制了反应, 对水解不是很有效<sup>[19]</sup>; 有的学者还进行了有添加剂的情况下采用水力空化强化罗丹明 B 降解的研究<sup>[20]</sup>; 有的对降解 orange-G 的水力空化装置的结构影响进行了研究<sup>[21]</sup>。

目前已有一些学者对文丘里管汽蚀进行了研究, 但影响汽蚀的因素很多, 有流动边界形状、绝对压力和流速等, 此外, 水流粘性、表面张力、汽化特性、水中杂质、边壁表面条件和所受的压力梯度等也有一定影响。本文对特定结构形式的文丘里管进行了汽蚀研究。

## 1 实验状态

### 1.1 实验系统

根据设计参数对 4 种文丘里管各加工了一件, 结构形式一样, 有入口直线段、收缩段、喉部直线段、扩张段、出口直线段。不同的是喉部直径, 分别为 3.0 mm, 2.5 mm, 2.0 mm 和 1.5 mm, 编为 1#, 2#, 3# 和 4#, 其中 4# 文丘里管见图 1。

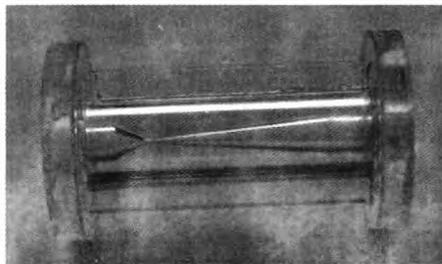
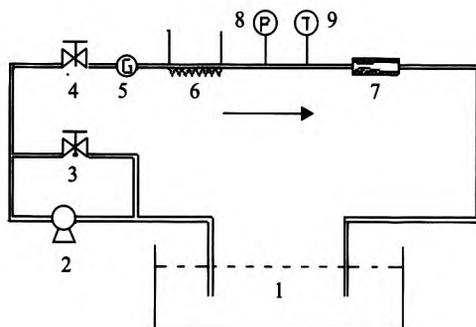


图 1 4# 文丘里管

Fig. 1 Venturi 4#

本文进行的实验系统见图 2。该实验系统主要由水箱 1, 柱塞泵 2, 阀门 3 和 4, 流量计 5, 电加热器 6, 文丘里管 7, 压力传感器 8 和温度传感器 9 组成。



1-水箱; 2-柱塞泵; 3-旁路阀; 4-主路阀; 5-流量计; 6-电加热器; 7-文丘里管; 8-压力传感器; 9-温度传感器

图 2 实验系统

Fig. 2 Experimental system

### 1.2 实验内容

本实验主要依据设计参数进行, 包括常温实验和加温实验。

常温实验中, 文丘里管出口通过管路直接回流至水箱, 可以认为出口压力为大气压, 对 1#~4# 文丘里管在实验环境温度下 ( $13^\circ\text{C}$ ) 进行不同入口压力下的实验, 测量入口压力、温度、流量, 并对实验段进行高速摄影。

加温实验中, 出口通过管路直接回流至水箱, 可以认为出口压力为大气压, 采用 4# 文丘里管进行水加温后实验, 实验时调整目标水温分别为  $23^\circ\text{C}$ ,  $33^\circ\text{C}$  和  $43^\circ\text{C}$ , 在各个温度下进行 0.2 MPa, 0.5 MPa 和 0.9 MPa 入口压力实验。

## 2 实验结果分析

### 2.1 入口压力与流量系数关系

由文丘里管流量计算公式可以反算流量系数, 计算公式为:

$$C_d = \frac{q_m}{A_1 \sqrt{2\rho(p_i - p_{\text{sat}})}}$$

式中:  $C_d$  为流量系数;  $q_m$  为质量流量;  $A_1$  为文丘里管喉部面积;  $\rho$  为水的密度;  $p_i$  为文丘里管入口

压力;  $p_{sat}$  为水的饱和蒸汽压。

根据实验数据可以得出环境温度下 1#~4# 文丘里管不同入口压力下流量系数 (见图 3)。

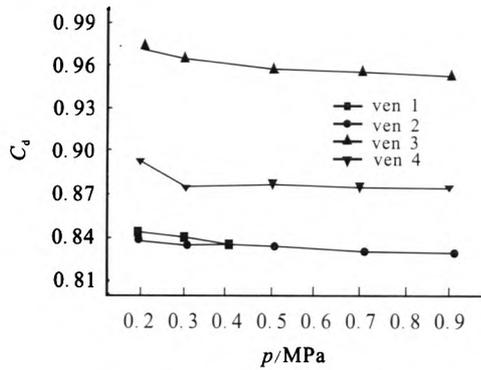


图 3 不同入口压力下的流量系数

Fig. 3 Flow coefficient at different inlet pressure

从图 3 可以看出, 对 4 种不同结构尺寸的文丘里管, 随着实验入口压力的增加, 流量系数呈减小的趋势, 分析认为, 入口压力增加时, 虽然在收缩段的阻力增加, 但流经文丘里管喉部时的速度也增加, 收缩效应更为明显, 等效流通面积减小, 这引起流量系数略有减小。

### 2.2 介质温度与流量系数的关系

4# 文丘里管在 13 °C, 23 °C, 33 °C 和 43 °C 下的流量系数与入口压力关系见图 4。

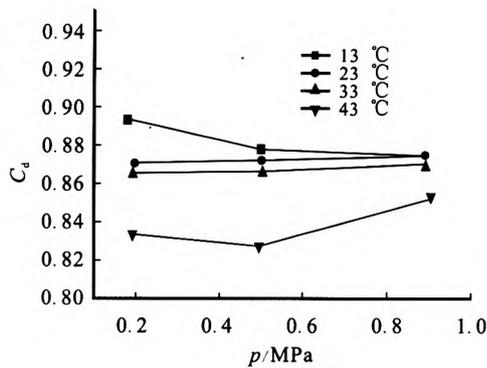


图 4 不同温度下流量系数与入口压力关系

Fig. 4 Relation between flow coefficient and inlet pressure at different temperature

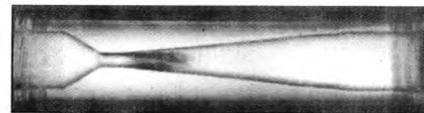
由图 4 可以看出, 随着水温的增加, 在相同入口压力下, 文丘里管的流量系数出现减小。分

析认为: 随着水温的增加, 水的密度减小; 而在相同入口压力条件下, 由能量转换可知, 密度越小, 在喉部的速度越大, 这样喉部的收缩效应越明显, 相应于等效流通面积减小, 流量系数降低。另一方面, 水温增加时, 水的饱和蒸汽压也增加, 这又会引起流量系数增加。从实验数据看出, 当水温在 33 °C 内时, 两者的影响相当, 流量系数变化不大, 当水温达到 43 °C 时, 密度的影响大于饱和蒸汽压的影响。这引起流量系数明显小于 33 °C 内的流量系数。

### 2.3 汽蚀区与入口压力关系

由于汽蚀时, 汽蚀区是大量气泡产生、发展、溃灭在某一时刻的综合表现, 其过程极其复杂, 影响因素繁多, 目前只能进行定性的分析。从实验情况看, 保持入口压力、入口温度、出口压力等均不变的情况下, 汽蚀区均发生较为明显的周期性变化, 时长时短。为了进行比较, 这里对汽蚀区最长时进行比较。

1# 文丘里管不同入口压力下汽蚀区见图 5。



(a) 入口压力 0.2 MPa



(b) 入口压力 0.3 MPa



(c) 入口压力 0.4 MPa



(d) 入口压力 0.5 MPa

图 5 汽蚀区(1# 文丘里管)

Fig. 5 Cavitation area (Venturi 1#)

从图 5 可以看出, 出口压力、结构参数等一

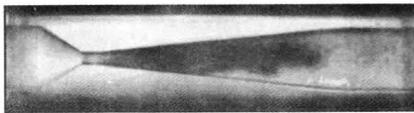
定时,入口压力越高,流量越大,汽蚀产生汽泡的速度也越快,同时在文丘里管相同位置的速度越大,在气泡相同的存在时间内,其运动的距离更远,这样汽蚀区长度明显增加。

#### 2.4 汽蚀区与喉部直径关系

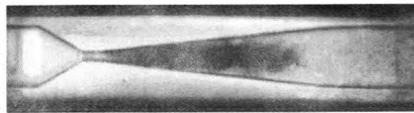
4种文丘里管均进行了0.2 MPa, 0.3 MPa和0.5 MPa入口压力下的汽蚀实验,由于入口压力越高,汽蚀越明显,为了比较更为清晰,以0.5 MPa入口压力下4种文丘里管汽蚀区进行比较(见图6)。



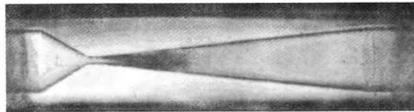
(a) 1# 文丘里管



(b) 2# 文丘里管



(c) 3# 文丘里管



(d) 4# 文丘里管

图6 汽蚀区(入口压力 0.5 MPa)

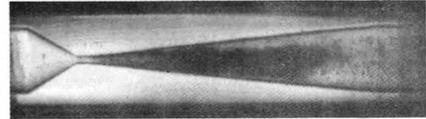
Fig. 6 Cavitation area (0.5 MPa inlet pressure)

从图6可以看出,在入口、出口压力相同的情况下,喉部流通面积越大,流量越大,汽泡产生的速度越大,气泡量增加,形成的汽蚀区长度越长。

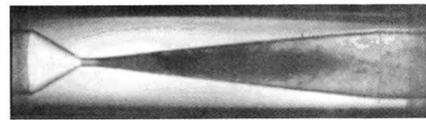
#### 2.5 汽蚀区与温度关系

在实验后期对4#文丘里管进行了加温实验,加温后温度分别为23℃, 33℃和43℃,对

0.2 MPa, 0.5 MPa和0.9 MPa入口压力下进行了实验,其中0.9 MPa入口压力时4#文丘里管在不同温度下的汽蚀区比较见图7。



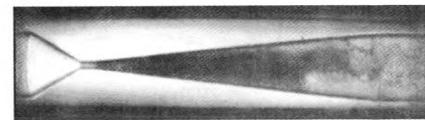
(a) 13℃



(b) 23℃



(c) 33℃



(d) 43℃

图7 4#文丘里管汽蚀区(入口压力 0.9 MPa)

Fig. 7 Cavitation area of Venturi 4# (0.9 MPa inlet pressure)

从图7可以看出,4种不同温度下汽蚀区长度差别不明显,分析认为与温度相差不大及入口压力/出口压力较大引起的汽蚀区较长有关。

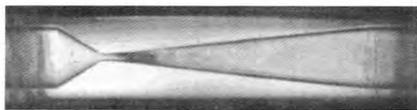
从图7还可看出,水的温度越高,汽蚀区的汽泡越分散,分析认为,温度越高,水的粘性降低,径向运动的约束减小,径向速度脉动增加。

#### 2.6 汽蚀区稳定性

实验中发现文丘里管汽蚀时汽蚀区很不稳定,采用同一个文丘里管,并且入口压力、入口温度一定,出口直接接入水箱的情况下,文丘里管的汽蚀区发生周期性的变化。同一文丘里管在相同入口、出口压力下,不同时刻的汽蚀区差别很明显,汽蚀程度差别较大,说明汽蚀是很不稳

定的。分析认为: 由于不同汽泡产生、发展、溃灭的过程不一致, 汽蚀区是大量汽泡产生、发展、溃灭的综合反映; 当文丘里管入口条件出现不稳定时, 汽蚀产生的汽泡量就会发生变化。实验过程中, 采用的是泵提供压力, 其出口压力、流量存在一定波动, 这引起汽蚀程度发生变化, 进而导致汽蚀区长度变化。

4# 文丘里管 0.5 MPa 入口压力下的汽蚀区变化见图 8。



(a) 实验中截图 (汽蚀区较短时)



(b) 实验中截图 (汽蚀区较长时)



(c) 计算水蒸汽云图

图 8 汽蚀区比较

Fig. 8 Comparison of cavitation areas

从图 8 可以看出, 计算的汽蚀区与实验中拍摄的较长汽蚀区基本一致。在实验中汽蚀区不稳定, 时长时短, 呈现周期性变化。对单个汽泡而言, 其生成、发展、溃灭过程不一致, 有一定的随机性, 大量气泡的运动形成汽蚀区, 因此具有一定的统计性。实验中时长时短, 分析认为与入口的流态不稳定有关, 入口压力、温度虽然波动幅度不大, 但这种波动对汽蚀会有影响; 而计算中, 设定入口边界条件后, 入口一直保持该边界条件, 这样, 汽蚀区就基本没有波动。

### 3 结论

对文丘里管的实验研究获得如下结论:

1) 随着入口压力的提高, 文丘里管的流量系数呈缓慢下降趋势。

2) 对同一文丘里管, 采用相同的流体介质在相同的入口压力下, 当温度超过某一值时, 流量系数出现明显减小。

3) 在相同入口、出口压力下, 喉部直径越大, 汽蚀形成的汽蚀区越明显。对同一文丘里管, 入口压力越大, 汽蚀区也越明显。

4) 对流体进行加温时, 在一定温度范围内, 汽蚀没有明显变化, 说明温度对水的汽蚀影响不是很大。实验发现文丘里管形成的汽蚀区不稳定, 时长时短, 呈现周期性变化。

#### 参考文献:

- [1] SAYYAADI H. Assessment of tandem Venturi on enhancement of cavitation chemical reaction[J]. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 2009, 131(1): 0113011-0113017.
- [2] FASI H F, GHASSEMI H. Experimental evaluation of cavitating venturi as a passive flow controller in different sizes [C]// *ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*. [S.l.]: ASME, 2010, 3: 417-423.
- [3] ARDIANSYAH T, ASABA M, MIURA K, et al. Characteristics of cavitation and erosion phenomena in sodium flow [C]// *Proceedings of International Conference on Nuclear Engineering*. [S.l.]: ICONE, 2010: 573-579.
- [4] VABRE A, GMAR M, LAZARO D, et al. Synchrotron ultra-fast X-ray imaging of a cavitating flow in a Venturi profile[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, 607(1): 215-217.
- [5] COUTIER D O, VABRE A, HOCEVAR M, et al. Investigation of velocity in cavitating flow by ultra fast X-ray imaging[C]// *13th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*. [S.l.]: [s.n.], 2010: 59-65.
- [6] SAYYAADI H. Instability of the cavitating flow in a venturi reactor [J]. *Fluid Dynamics Research*. 2010, 42(5): 111-118.
- [7] ARDIANSYAH T, TAKAHASHI M, YOSHIZAWA Y, et al. Numerical simulation of cavitation for comparison of

- sodium and water flows[C]// Proceedings of International Conference on Nuclear Engineering. [S.l.]: ICONE, 2010, 4: 615-622.
- [8] 张小斌, 曹潇丽, 邱利民, 等. 液氧文氏管汽蚀特性计算流体力学研究[J]. 化工学报, 2009, 60(7): 1638-1643.
- [9] 史刚, 梁国柱. 以  $N_2O$  为工质的汽蚀文氏管流场仿真[J]. 航空动力学报, 2012, 27(2): 465-471.
- [10] DITTAKAVI N, CHUNEKAR A, FRANKEL S. Large eddy simulation of turbulent-cavitation interactions in a venturi nozzle[J]. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 2010, 132(12): 1-11.
- [11] NOURI N M, MIRSAEEDI S M H, MOGHIMI M. Large eddy simulation of natural cavitating flows in Venturi-type sections[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2011, 225(2): 369-381.
- [12] DE GIORGI M G, FICARELLA A, RODIO M G. Cavitation modeling in cryogenic fluids for liquid rocket engine applications[C]// 38th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. [S.l.]: AIAA, 2008: 45-50.
- [13] GONCALVES E, CHAMPAGNAC M, PATELLA R F. Comparison of numerical solvers for cavitating flows [J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2010, 24(6): 201-216.
- [14] 谭建国, 刘景华, 王振国. 一种适用于系统仿真的文氏管动态模型[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(12): 2788-2794.
- [15] BASHIE T A, SONI A G, MAHULKAR A V, et al. The CFD driven optimisation of a modified venturi for cavitation activity [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering. 2011, 89(6): 1366-1375.
- [16] GONCALVES E, DECAIX J, PATELLA R F. Unsteady simulation of cavitating flows in Venturi[J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(5): 711-716.
- [17] KIM H J, NGUYEN D X, BAE J H. The performance of the sludge pretreatment system with venturi tubes [J]. Water Science and Technology, 2008, 57(1): 131-137.
- [18] SAHARAN V K, BADVE M P, PANDIT A B. Degradation of reactive red 120 dye using hydrodynamic cavitation[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 178: 100-107.
- [19] SAINTE B R, MORISON K R. Enzymatic hydrolysis of canola oil with hydrodynamic cavitation [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2010, 49(10): 1101-1106.
- [20] MISHRA K P, GOGATE P R. Intensification of degradation of Rhodamine B using hydrodynamic cavitation in the presence of additives[J]. Separation and Purification Technology, 2010, 75(3): 385-391.
- [21] SAHARAN V K, RIZWANI M A, MALANI A A, et al. Effect of geometry of hydrodynamically cavitating device on degradation of orange-G[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2013, 20(1): 345-353.

(编辑: 王建喜)