

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20180704001

# ASTM G134 装置的射流空化模拟与空蚀机理分析

周明明<sup>1</sup>, 康 灿<sup>1</sup>, 刘海霞<sup>2</sup>, 陈金豪<sup>2</sup>

(1. 江苏大学 能源与动力工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学 材料科学与工程学院, 镇江 212013)

**摘 要:** 为解释流动对射流空化和空蚀的影响, 以 ASTM G134 射流空蚀实验台为对象, 应用计算流体动力学方法揭示空蚀腔内的空化区形态, 进而开展空蚀试验, 获得试样表面的空蚀形貌, 与模拟结果进行对比分析。结果表明: 射流在空蚀腔内保持平稳发展的形态; 射流核心段存在高速区, 其外围为环形低压区, 该环形区是产生射流空化的关键; 射流与试样表面接触后, 试样表面的空蚀区与环形空化区相对应。试验结果表明, 在空蚀试验初期, 试样表面的空蚀区呈环形, 与模拟结果一致; 随着空蚀的发展, 环形空蚀区扩大, 空蚀由环形区向试样中心区扩散; 空蚀时间的继续延长导致试样中心区亦出现严重的材料剥落, 此时试样的累积质量损失仍在增长, 但累积质量损失率保持稳定。

**关键词:** 空化射流; ASTM G134 标准; 空蚀; 流场; 数值模拟

中图分类号: TG668

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)06-0133-10

## Waterjet Cavitation Simulation and Erosion Mechanism Analysis of ASTM G134 Device

ZHOU Mingming<sup>1</sup>, KANG Can<sup>1</sup>, LIU Haixia<sup>2</sup>, CHEN Jinhao<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** To explain effects of jet flow on jet cavitation and cavitation erosion, an investigation was carried out based on the ASTM G134 standard waterjet cavitation erosion test rig. Computational fluid dynamics technique was used to reveal cavitation patterns in the test chamber. Furthermore, experiments were performed to obtain morphologies of the eroded surfaces, which were also used for a joint analysis with simulation results. The results indicate that the waterjet in the test chamber manifests a stable development pattern. High velocity arises in the core region of the jet stream, while an annular low-pressure zone enclosing the core region is found. Such an annular low-pressure zone is vital for the generation of cavitation. As the jet arrives at the specimen, an annular area on the specimen surface that corresponds to the annular cavitation zone in the jet stream is supposed to be the eroded area. The cavitation erosion experiment results indicate that a ring cavitation erosion zone arises at the initial stage of cavitation erosion. As cavitation erosion progresses, the ring erosion zone is expanded and cavitation erosion is extended to the central part of the specimen surface. Further elongation of cavitation erosion gives rise to severe material removal that occurs in the central region as well. Meanwhile, the cumulative mass loss rises consistently; however, the cumulative mass loss rate remains nearly invariant.

**Keywords:** cavitating waterjet; ASTM G134 standard; cavitation erosion; flow field; numerical simulation

收稿日期: 2018-07-04; 修回日期: 2018-11-01

网络出版日期: 2018-12-04 09:16; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20181204.0915.004.html>

通信作者: 刘海霞 (1977—), 女 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 金属材料的表面强化与空蚀机理; **E-mail:** liuhx@mail.ujs.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (51775251, 51376081)

**Fund:** Supported by National Natural Science Foundation of China (51775251, 51376081)

引用格式: 周明明, 康灿, 刘海霞, 等. ASTM G134 装置的射流空化模拟与空蚀机理分析[J]. 中国表面工程, 2018, 31(6): 133-142.

ZHOU M M, KANG C, LIU H X, et al. Waterjet cavitation simulation and erosion mechanism analysis of ASTM G134 device[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(6): 133-142.

## 0 引言

空化是发生在液体中的一种相变现象<sup>[1]</sup>。当液体中的局部压力低于相应温度下的饱和蒸汽压力时,液体中的空化核会长大成为空化泡;当局部压力恢复至高于饱和蒸汽压力时,空化泡溃灭。空化现象以空化核的长大和空化泡的溃灭为主要特征。空化泡的瞬间溃灭将产生强大的冲击波,其对于邻近的固体表面产生强烈的冲击,这种冲击反复进行,将会使固体材料从起初的变形到局部剥落,再至大片材料从基体上脱离,即出现明显的空蚀。空蚀不但与固体材料相关,也与流体相关;因此,空蚀是一个多学科交叉的问题。水射流是产生空化的一种重要手段。空化水射流中的空泡溃灭后能够增强材料的疲劳强度<sup>[2]</sup>。持续的空泡溃灭将对材料表面产生破坏作用<sup>[3]</sup>。

以往对于射流空蚀的研究多侧重固体材料对空化泡溃灭的响应,而鲜见流体力学方面的研究。开展射流空蚀研究的标准装置是符合 ASTM G134 标准的淹没水射流实验台<sup>[4]</sup>。该标准中对实验台的圆柱形空蚀腔体的尺寸并无严格的规定,其建议的腔体长度为 50 mm,宽度为 50 mm。在如此有限的空间内,无论是射流本身还是空蚀机理的研究均非易事。从流场测量的角度,光学测量方法如粒子图像速度场仪 (PIV) 难以分辨被腔体内的水和空化泡包围的射流束;高速摄像技术也难以捕捉速度超过 100 m/s 的射流束中的空化现象。尽管 ASTM G134 标准空蚀实验台已被应用于材料抗空蚀能力的检测与对比,但对于影响空蚀效果的因素的理解还不够充分,导致实验台的改进与优化缺少必要的依据。

近年来,国内外对空化射流的研究主要集中在大空间射流,研究方法集中在流动数值模拟和试样表面形貌分析两个方面。Liu H X 等<sup>[5]</sup>使用数值模拟的方法研究了一种特殊的中心体喷嘴,发现中心体射流的空化效果优于普通的锥形喷嘴产生的射流。Mouvanal S 等<sup>[6]</sup>模拟了燃料注射器内空化泡溃灭产生的冲击波,得到的模拟结果与试验结果较吻合。He C X 等<sup>[7]</sup>对圆形喷嘴内的混合射流进行了模拟,模拟得到的速度和浓度分布与试验结果一致。在空蚀试验研究方面, Li D 等<sup>[8]</sup>研究了风琴管喷嘴射流的空蚀特性,发现靶距是影响空蚀的主要因素。Martinović S 等<sup>[9]</sup>借助表面

形貌分析的方法对堇青石和锆石试样的抗空蚀能力进行了研究。Zou J 等<sup>[10]</sup>在根据 ASTM G134 标准搭建的实验台上研究了 AlSi10Mg 试样的空蚀特性,发现 AlSi10Mg 的表面微观结构是决定抗空蚀能力的根本因素。

流动是解释射流空化机理和空蚀效果的关键。文中以 ASTM G134 标准实验台为对象,运用计算流体力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 技术模拟射流在该实验台的空蚀腔内的发展过程,对试样表面的空蚀结果进行预测;根据 ASTM G134 标准搭建射流空蚀实验台,采用与数值模拟相同的运行参数对铝合金试样进行空蚀试验,并对数值模拟与试验结果进行关联分析,在验证数值模拟的有效性的同时,阐释两种方法之间的相互支撑作用。从而在 ASTM G134 标准实验台的空蚀条件下,从射流流动的角度解释影响空蚀的因素。

## 1 物理模型与网格划分

所研究的空蚀腔的结构如图 1(a) 所示,该空蚀腔为圆柱形,内径  $D=40$  mm,长度  $L=30$  mm。喷嘴结构如图 1(b) 所示,喷嘴内径  $d=0.4$  mm,其下游为内径 2 mm 的直管。图 1(c) 为喷嘴和空蚀腔的三维模型。喷嘴的轴心线的延长线经过试样表面的中心并与试样表面垂直,试样距离喷嘴进口的距离为 19 mm<sup>[11]</sup>;射流方向与空蚀腔的轴线垂直。在空蚀过程中,空蚀腔内始终充满着水。自空蚀腔内提取流体充满的空间,即水体域,如图 1(d) 所示,图中坐标原点即为喷嘴入口截面的中心点。水体域是容纳射流流动和空化发展的空间;在数值模拟中,将水体域离散为网格节点,求解流动控制方程和空化方程后,在每个网格节点上都可以获得流动参数的值,从而获得流场中的流动参数分布和空化区形态。

在模拟过程中,针对空蚀腔体的有限尺寸,并且为了提高模拟的精度,在商用网格划分软件 ICEM 中采用六面体结构网格对图 1(d) 所示的水体计算域进行空间剖分,图 2(a) 为整个水体域的轴截面网格示意图。由于射流轴线附近流动参数变化剧烈,所以对喷嘴出口到试样表面之间的网格进行局部加密处理。图 2(b) 为试样表面的网格示意图。

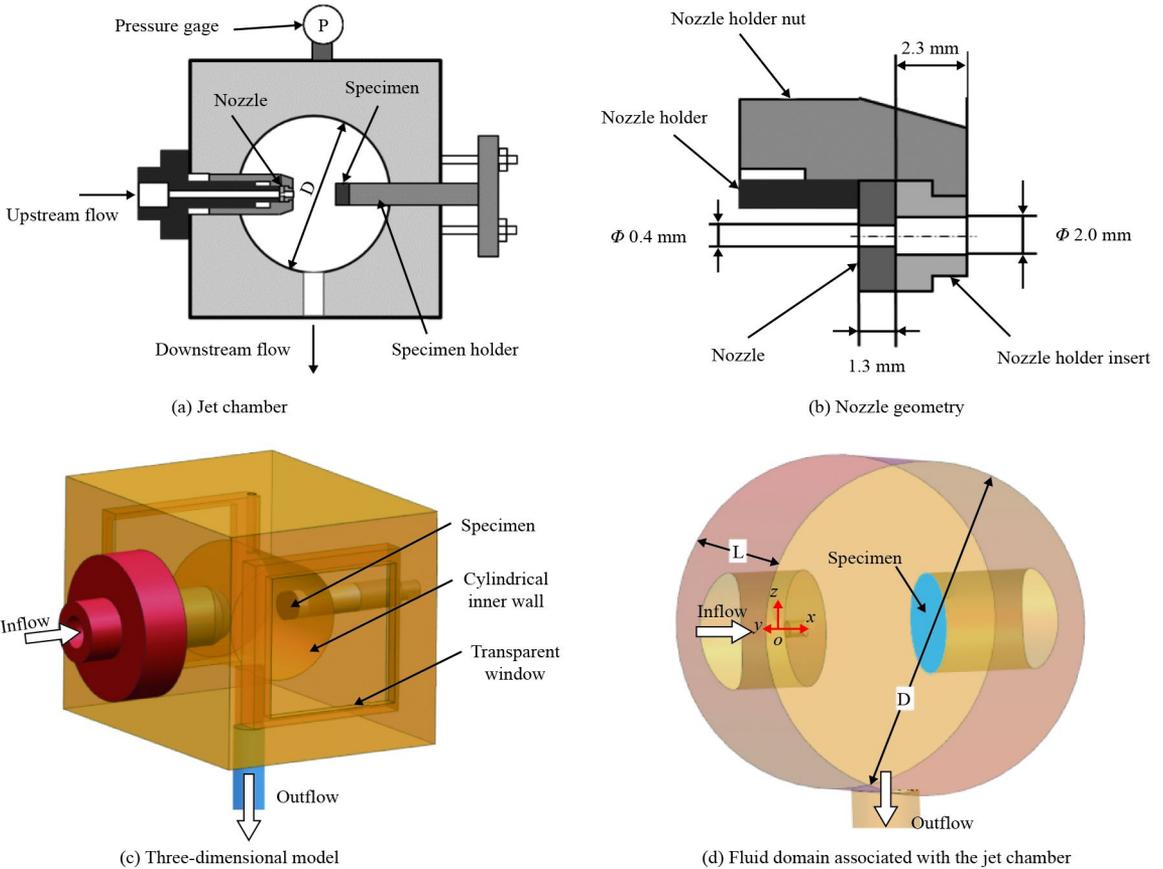


图 1 计算域的几何形状

Fig.1 Geometry of the computational domain

## 2 数值模型

### 2.1 控制方程

假设空蚀腔内的淹没射流为均相混合流动, 下式中的连续性方程、动量方程和输送方程组成多相流动的基本能量方程, 表达式如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot [(\mu_m + \mu_t) \nabla \mathbf{u}] + \frac{1}{3} \nabla [(\mu_m + \mu_t) \nabla \cdot \mathbf{u}] \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \mathbf{u}) = \dot{m}^+ + \dot{m}^- \quad (3)$$

式中,  $\rho_m$  和  $\mu_m$  分别为均相混合物的密度和动力粘度系数;  $\mathbf{u}$  为流动速度矢量;  $\mu_t$  为湍流动力粘度系数;  $\alpha_v$  和  $\rho_v$  分别表示气相体积分数和气相密度;  $\dot{m}^+$  和  $\dot{m}^-$  分别表示水蒸汽蒸发(空化泡生长)和水蒸汽凝结(空化泡溃灭)的质量输送源项。

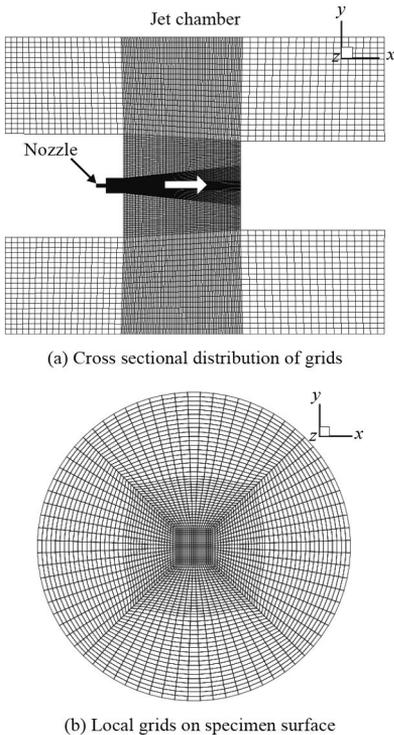


图 2 计算域网格

Fig.2 Grids for the computational domain

空化流动通常采用混合多相流动求解方法求解,为了简化计算模型,将空化流体还原成水、水蒸汽和不凝结汽核的三项混合物进行模拟。此时混合物的相数  $N=3$ ,混合物的密度  $\rho_m$  为下式:

$$\rho_m = [\alpha_v \rho_v + (1 - \alpha_v - \alpha_g) \rho_l] / (1 - f_g) \quad (4)$$

式中,  $\alpha_v$  和  $\rho_v$  分别为空化相体积分数和密度;  $\alpha_g$  和  $f_g$  分别为不凝结汽核的体积分数和密度;  $\rho_l$  为水的密度。

## 2.2 湍流模型

根据文献[12]的研究结论,使用 RNG k- $\varepsilon$  湍流模型对淹没射流进行模拟时得到的结果与试验偏差最小。因为空化过程中存在汽相,混合相具有可压缩性特征,流动过程是多相流动,因此需要考虑混合物的密度变化对湍流动力粘度系数 ( $\mu_t$ ) 的影响。为此引入  $f(\rho_m)$  修正动力粘度系数,其修正方程为:

$$\mu_t = f(\rho_m) C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$f(\rho_m) = \rho_v + \frac{(\rho_m - \rho_v)^n}{(\rho_l - \rho_v)^{n-1}} \quad (6)$$

式中,  $\varepsilon$  为湍动能耗散率;  $n$  为常数,此处取 10。

## 2.3 多相流模型

从机理上看,射流空化的表现形态为空化云,也就意味着空化相与液相之间存在着明显的分界面。VOF (Volume of Fluid) 模型在捕捉相界面方面具有优势。能够捕捉相分界面,也就意味着能界定空化发生的区域,从而可以对空化泡溃灭的影响进行预测,因此本研究中选用 VOF 模型,其表达式为<sup>[13]</sup>:

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1 \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\alpha_1 \alpha_v \mathbf{v}_r) = \alpha_1 \alpha_v \left( \frac{1}{\rho_v} \frac{d\rho_v}{dt} - \frac{1}{\rho_l} \frac{d\rho_l}{dt} \right) + \alpha_1 \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (7)$$

式中:人为定义的可压缩速度  $\mathbf{v}_r = n_f \min [C_\alpha \frac{|\varphi|}{|\mathbf{S}_f|}, \max(\frac{|\varphi|}{|\mathbf{S}_f|})]$ ,  $n_f$  表示交界面上的法向量,  $\varphi$  表示质量通量,  $\mathbf{S}_f$  表示交界面区域矢量,  $C_\alpha$  表示交界面的可压缩性能 ( $C_\alpha \geq 0$ )。

## 2.4 空化模型

模拟中的空化模型采用 Schnerr-Sauer 空化模

型,其定义相间质量输送率为:

$$\dot{m}^+ = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_l}} \quad (8)$$

$$\dot{m}^- = -\frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P - P_v}{\rho_l}} \quad (9)$$

式中,蒸汽体积分数  $\alpha_v = \frac{n_0 \cdot \frac{4}{3} \pi R_B^3}{1 + n_0 \cdot \frac{4}{3} \pi R_B^3}$ ,  $n_0$

为每单位体积液体中包含的空化泡个数,  $R_B$  为空化泡半径,  $P_v$  为饱和蒸汽压力,即相变临界压力。

## 2.5 边界条件设置及参数选择

空化数  $\sigma$  的定义如下:

$$\sigma = \frac{P_{out} - P_v}{P_{in} - P_{out}} \quad (10)$$

式中,  $P_{in}$  和  $P_{out}$  分别为进口和出口压力,  $P_v$  为常温下的饱和蒸汽压力。由于  $P_{in} \gg P_{out} \gg P_v$ , 故上式也可以简化成:

$$\sigma = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (11)$$

当空化数  $\sigma=0.014$  时,最有利于空化射流的发展<sup>[14]</sup>。

在空蚀腔上游设置了长度为 10 倍的喷嘴体入口直径的直管段,保证流动充分发展。在直管段的入口设定速度进口边界条件,取  $v_{in}=192$  m/s; 出口设为压力出口边界条件,取  $P_{out}=0.28$  MPa; 试样的边界条件为无滑移壁面;其他边界也设置为无滑移壁面;初始化整个计算域内的压力为  $P_{tank}=0.28$  MPa;非稳态时间步长选取  $2 \times 10^{-7}$  s,该时间步长与进口流速大小和最小网格尺度有关。文中最小网格长度除以最大进口流速得到的时间为  $3.25 \times 10^{-7}$  s,非稳态时间步长选取  $2 \times 10^{-7}$  s,则能够使所划分的网格捕捉瞬态流动现象。

## 2.6 网格无关性验证

网格数量是决定模拟结果准确性的重要因素。针对图 1 中所示的计算域,设计了 5 套不同网格数的方案,网格数从约  $42.4 \times 10^4$  到  $194 \times 10^4$ 。采用相同的模拟参数设置,以喷嘴出口断面的中心点速度  $U$  为参考,获得的计算结果如表 1 所示。当网格数小于  $106.7 \times 10^4$  时,喷嘴出口断面的

中心点速度随着网格数增加而急剧下降, 当网格数达到和超过  $106.5 \times 10^4$  时, 相邻计算结果之间的相对偏差小于 2% (以网格数最多的方案为参考)。最终选择了网格数为  $106.7 \times 10^4$  的方案。

表 1 喷嘴出口截面中心点速度随网格数的变化

Table 1 Comparison of axial velocity at the center of nozzle outlet section with different grid numbers

Grid number ( $\times 10^4$ )	42.4	79.7	106.5	152.8	194.0
$U/(m \cdot s^{-1})$	130.7	121.2	106.7	105.9	105.5
Relative deviation/%	23.9	14.9	1.1	0.4	0

对于确定的网格方案, 为进一步验证数值计算结果的有效性, 在非定常计算条件下, 将每一个时间步内的被监测量的收敛标准均设为  $10^{-4}$ ; 在每一时间步内采取不同的迭代次数进行计算; 以计算获得的射流中心线上的速度分布为考察对象, 通过对比分析判断计算结果是否达到稳定。迭代次数分别为 500、1500、3500 和 6000 时的计算结果见图 3。

由图 3 可以看出, 迭代次数从 500 增加到 1500 时, 速度分布曲线的位置发生了明显的变化, 而当迭代次数继续增加至 6000 时, 速度分布曲线基本重合, 结合收敛标准的量级, 可以认为计算结果已经稳定。

另外, 靠近喷嘴入口 ( $x=0$  mm) 的部分, 速度分布受迭代次数的影响不明显, 因为该部分射流束的集聚性强, 环境水体对射流束的影响不大; 随着射流束的扩散, 环境水体与射流束之间的掺混加剧, 当迭代次数增加到一定程度时, 数值计

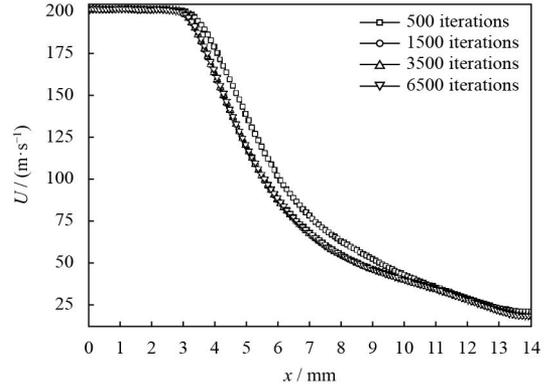


图 3 迭代次数对中心线轴向速度分布的影响

Fig.3 Variation of the distribution of axial velocity over jet centerline with number of iterations

算结果可以反映射流流动这一物理现象。

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 射流空化流场分析

在空化的模拟中常使用无量纲的空化体积分数  $\alpha_v$  表征液体的空化程度。图 4 为腔体内  $\alpha_v=0.1$  时的空化体积等值面图, 图中描述的是射流产生的空化泡从初生到在试样表面溃灭的全过程, 图中左侧为射流产生的空化泡, 右侧为试样表面。  $t=0$  ms 为射流从喷嘴出口射出的时刻, 如图 4(a) 所示, 射流在喷嘴出口处形成初生的环形空化区, 该空化区沿着射流主流方向长大。空化区的形状与喷嘴出口的形状有关, 椭圆形喷嘴射流中也存在类似的环形空化区, 但形态不同<sup>[15]</sup>。射流轴线附近的流动速度高, 该部分为射流集束区, 不与腔内的环境水体产生能量交换, 不发生空化;

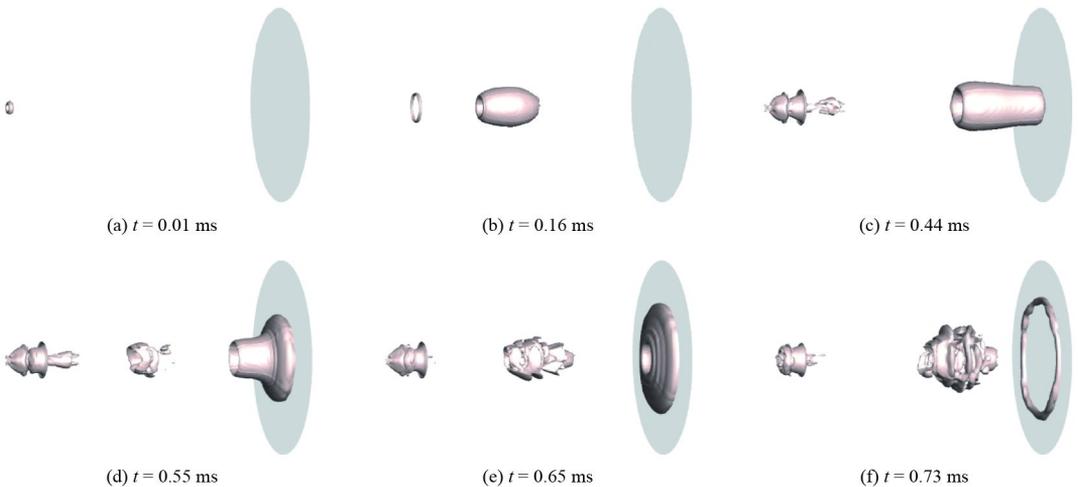


图 4 空蚀腔内的空化体积分数等值面图 ( $\alpha_v=0.1$ )

Fig.4 Isosurface of cavitation volume fraction in the jet chamber ( $\alpha_v=0.1$ )

而在射流径向方向上,由于射流与周围水产生剪切作用,卷吸周围水体,交换能量,射流在径向上速度迅速减小<sup>[16]</sup>,出现较高的速度梯度和涡量,从而产生低压层,这是射流空化产生的根本原因。当 $t=0.44$  ms时,空化泡的前端到达试样表面。受到试样的影响,空化泡在试样表面铺展,试样表面的空化区逐渐增大,由于试样表面压力大于空泡内部压力,空泡最终在试样表面溃灭,图4(c)~(f)即为空化泡从接触试样表面到最终溃灭的过程。

### 3.2 距离试样表面 0.5 mm 的上游截面的压力和空化体积分数分布

图5为距离试样表面 0.5 mm 的上游截面的压力和空化体积分数分布图,其左半部分为压力分布,右半部分为空化体积分数,从图中可以看出该截面的中心位置存在高压中心,并且在高压中心的外围出现一个圆环状的低压区域,空化区基本与圆环低压区重合。随着射流的发展,试样表面附近的高压区逐渐扩大,该高压区是由于射流的高速核心区接近试样表面时受到试样表面的阻

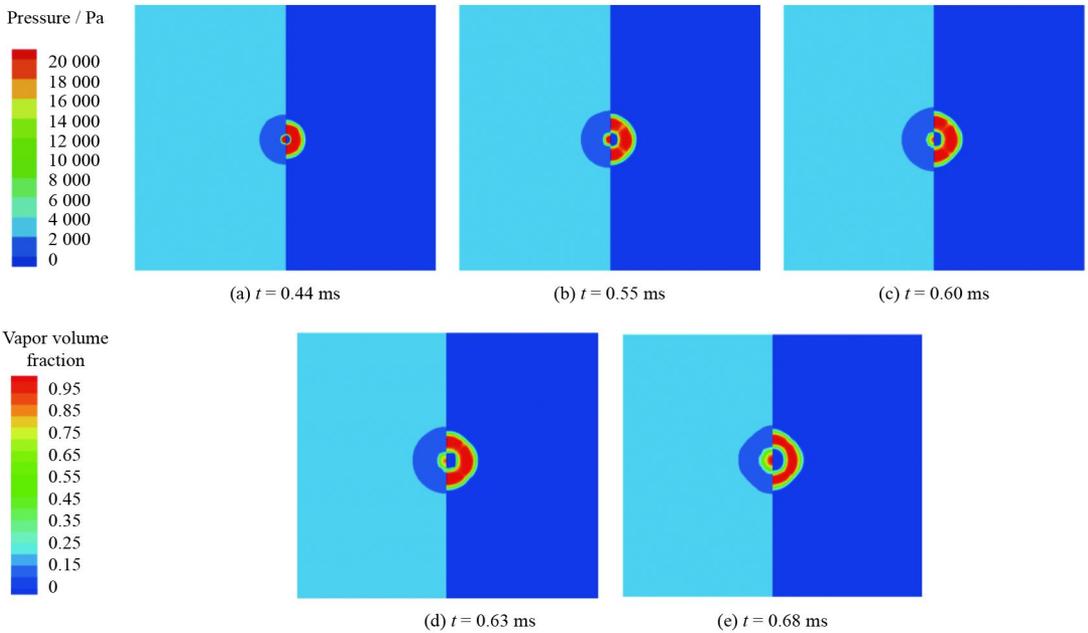


图5 距离试样表面 0.5 mm 的上游截面的压力和空化体积分数分布

Fig.5 Distributions of pressure and cavitation volume fraction on the cross section of 0.5 mm from the specimen surface

碍所致。高压则抑制空化,所以试样表面在正对射流中心处无空化产生。随着射流的轴向发展,试样表面的流体不断沿径向扩展,同时,圆环形的低压区也向试样外围延展,相应的空化圆环也逐渐增大。

图6为距离试样表面 0.5 mm 的上游截面的空化体积分数沿径向的分布。可以看出,该截面上的空化区明显向试样外围扩展,空化区的半径逐渐增大。此次模拟中使用的喷嘴直径很小( $d=0.4$  mm),所以当空化泡接触到该截面的初期,中心高压区(无空化区域)的范围均很小。随着射流的发展,高压区覆盖的范围逐渐增加,环形空化区逐渐向试样外围延伸。可以预测,该环形空化区将对试样表面产生较为集中的空蚀作用。

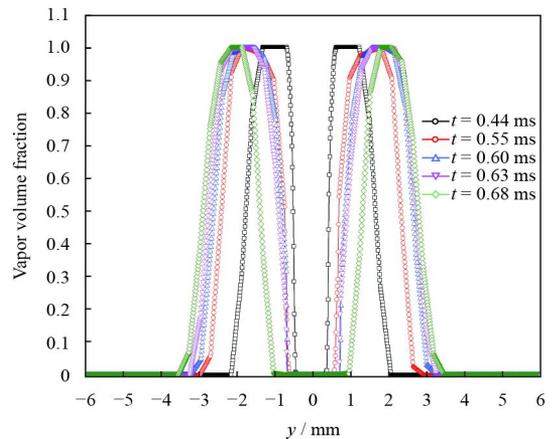


图6 距离试样表面 0.5 mm 的上游截面的空化相体积分数沿径向的分布

Fig.6 Distributions of cavitation volume fraction on the cross section of 0.5 mm from the specimen surface

### 3.3 试样表面的涡量分布

高速水射流流束与周围的水之间存在速度差, 形成涡量。涡量越大, 旋涡的强度越大, 涡心位置的静压强越低, 越有利于空化的发生。试样表面的涡量分布如图7所示。由图4见,  $t=0.44$  ms 时射流产生的空化腔到达试样, 故对试样表面涡量分布的研究从 0.44 ms 开始。从图7可以看出试样表面的涡量分布呈现以试样中心为圆心的中心对称分布。由于喷嘴直径很小, 射流在刚接触到试样表面时的高涡量聚集区很小, 随着射流持续打击试样, 高涡量区逐渐向试样外围扩散, 试

样表面的高涡量区面积增大。由此, 产生空蚀的区域也将逐渐向试样外围扩展。无限空间射流中也存在类似的对称涡量分布形态<sup>[17]</sup>。由于试样中心正对着射流轴线, 射流轴线上的速度大, 附近的水不易产生涡量。张欣玮等<sup>[18]</sup>使用大涡模拟与试验相结合的方法证明了射流在主流方向上存在无旋区。在图7所示时间段内, 试样表面的涡量峰值先增加再减小, 在  $t=0.63$  ms 时达到最大值, 该时刻速度梯度大, 有利于空化的形成; 而后, 总涡量减少, 说明试样的空蚀过程并不稳定, 而是存在着空化的起伏和空蚀程度的波动。

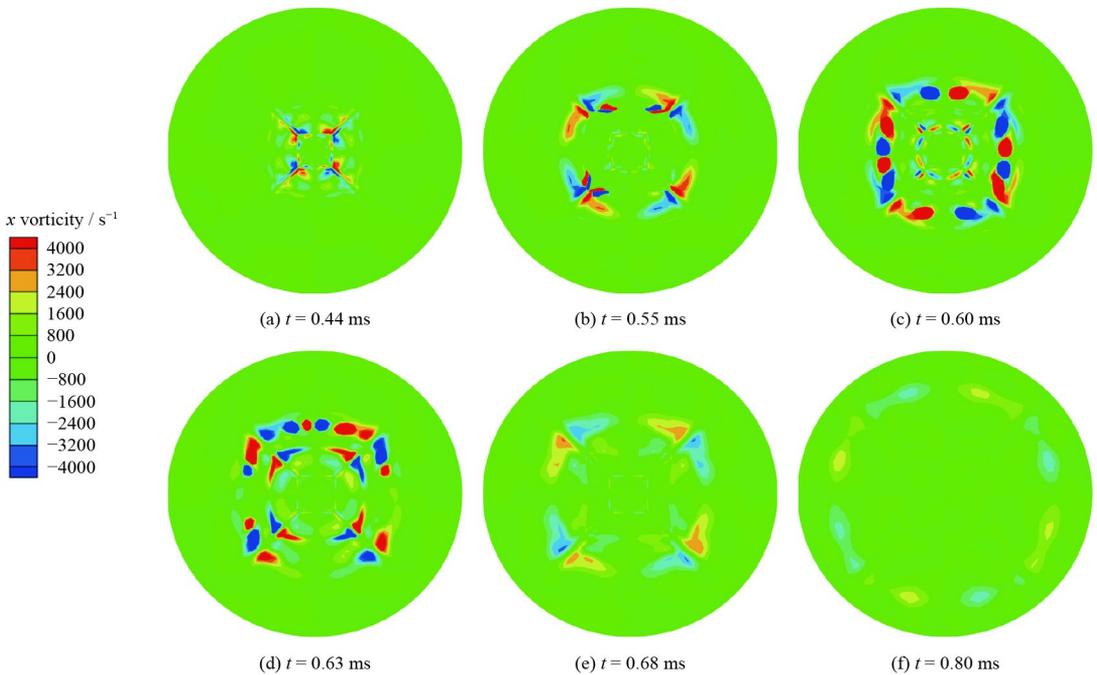


图7 试样表面的涡量分布及随时间的变化

Fig.7 Time-dependent variation of the distribution of vorticity on specimen surface

### 3.4 试样表面的径向速度变化

试样表面的径向速度是表征射流在试样表面上扩散快慢的参数, 径向速度越大, 射流在试样表面扩散得越快, 被射流携带的空化泡在试样表面的迁移也越快。图8为射流中的空化泡在到达试样表面后, 试样表面的射流径向速度分布, 从图中可以明显看出径向速度呈对称双峰分布形态, 即在相对于坐标原点对称的位置, 径向速度的大小相同但方向相反。当  $t=0.44$  ms 时, 射流刚接触到试样, 射流未受到试样的明显影响, 高速区范围小, 射流能量集中, 与周围水之间的速度

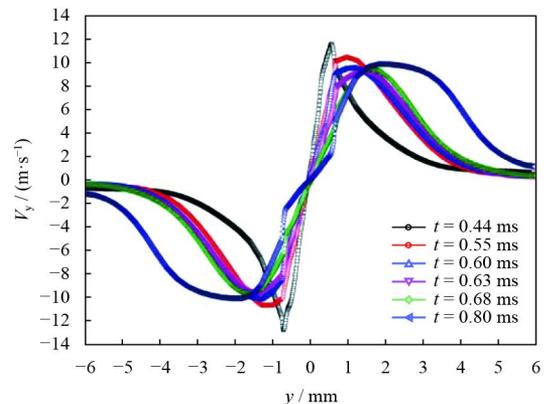


图8 试样表面的径向速度分布

Fig.8 Distributions of radial velocity on specimen surface

梯度大。随着射流在试样表面逐渐铺展, 高速区扩大, 射流径向速度的高速区逐渐向试样外围移动。同时, 试样表面出现一个存在较高径向速度的圆环区域。图 8 说明试样表面发生着空化泡反复溃灭和射流流体迁移的动态过程。

### 3.5 空化特性分析

试样表面的速度和压强分布对试样表面的冲蚀效果有很大影响, 图 9 为对瞬态模拟结果进行平均处理后得到的结果, 图中的云图表示靠近试样表面的射流速度分布, 等值线表示试样附近的压强分布。区域 A 为射流中心区, 但其很少受到射流空蚀, 这主要是因为区域 A 的压强高, 该区域的空化体积分数小, 所以该处的试样表面很少受到空泡溃灭的冲击; 区域 B 为试样表面空蚀风险最大的区域, 该区域内压强较低, 速度适中, 空泡容易聚集, 空化体积分数大, 且该区域的压力远高于空蚀腔内的背景压力, 空化泡容易溃灭, 从而诱发试样表面的空蚀; 区域 C 为试样边缘区域, 该区域压强较低, 速度较低, 空化泡不易在该区域溃灭。如果试样表面存在空蚀区域, 其应该呈圆环状, 且与试样表面的压力和速度分布存在着紧密关联。

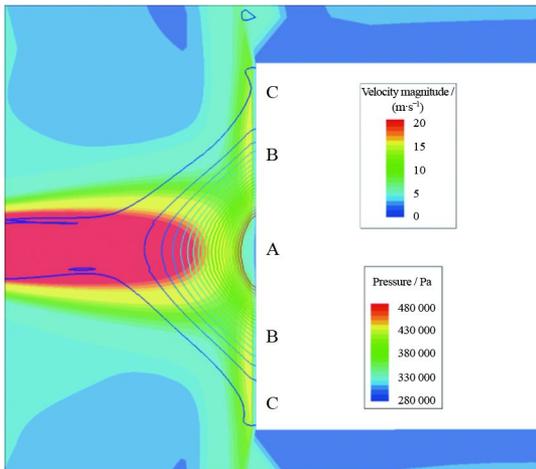


图 9 试样表面的速度和压力分布

Fig.9 Velocity and pressure distributions on specimen surface

## 4 空蚀特性试验

图 10 为根据 ASTM G134 标准搭建的材料表面空蚀特性实验台的示意图, 试验中所用的空蚀腔尺寸与数值模拟中的对应设置完全一致, 试验中采用的圆柱形空蚀腔的直径  $D=40$  mm, 长度  $L=$

30 mm, 喷嘴直径  $d=0.4$  mm, 选用 1060 铝合金作为试样材料, 试样直径为 12 mm, 试样距离喷嘴 19 mm。试验前对线切割得到试样的表面采用 800~1500 号的砂纸进行研磨, 而后在乙醇中进行超声清洗 10 min, 然后吹干后用 Sartorius 天平进行称重。试验中, 每个试验工况取 3 个试样, 每次空蚀后的试样进行吹干后进行称重和表面观察。

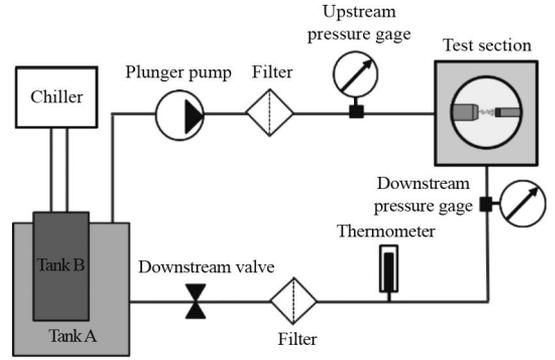


图 10 空蚀特性试验台示意图

Fig.10 Schematic diagram of cavitating jet test rig

试验中, 进口压力为 20 MPa, 空化数选定为 0.014。空化数由进口压力和腔体内的背压共同决定, 在试验过程中, 通过与空蚀腔连接的稳压装置, 将空蚀腔体内的背压稳定在 0.28 MPa, 从而使空化数保持稳定。在试验过程中空蚀腔体一直充满着水, 试样完全淹没于水中, 通过水箱 B 中的冷水机组确保循环回路中的水温保持在  $(25 \pm 2)$  °C。

试样表面的累积质量损失和质量损失率曲线如图 11 所示。随着射流对试样表面空蚀的延长, 试样的累积质量损失持续增大, 从图中可以看出从第 3 min 开始试样的累积质量损失呈现近似于线性趋势的增长, 其斜率约为 1.7625。同时, 试样的累积质量损失率随空蚀时间逐渐增大, 在空蚀 10 min 后, 累积质量损失率的值逐渐趋于稳定。累积质量损失率为累积质量损失与空蚀时间的比值, 所以图 11 中两个参量曲线的形态并不一致。试验刚开始时, 试样表面主要发生的是强化作用, 材料去除较少; 随着材料表面的变形, 并且空化泡的溃灭不断冲击试样表面, 出现空蚀坑; 随着空蚀时间延长, 蚀坑扩大, 材料的质量损失增加。

图 12 为不同时刻试样表面的空蚀形态, 当  $t=5$  min 时试样表面呈现环状, 在试样中心确实存

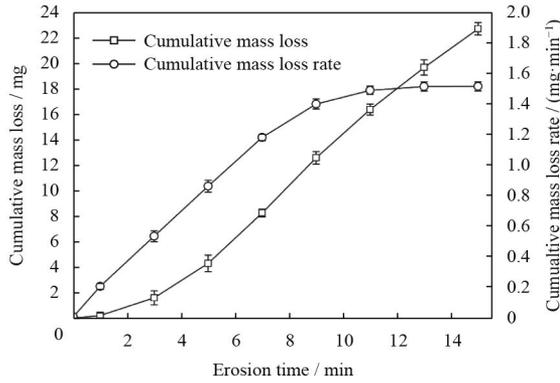


图 11 试样的累积质量损失和质量损失率

Fig.11 Cumulative mass loss and mass loss rate of specimens

在着未空蚀区域,这与数值模拟结果一致,且试验结果中的环形区域的尺寸与模拟结果接近。

Fujisawa N 等在空蚀实验台上得到了类似的环形空蚀<sup>[19]</sup>。随着空蚀试验的进行,在  $t=7$  min 时,环形空蚀区扩大,且空蚀坑的数量和尺寸均出现明显增长,试样的质量损失增大。及至  $t=15$  min,整个试样表面出现材料的严重剥落,空化泡的溃灭扩散至整个试样表面。对于试样表面的空蚀形貌随时间变化的模拟,其属于固体部件对空蚀的反应,CFD 无法解决空蚀随时间发展的描述问题。到达图 12(c) 所示的空蚀程度后,材料表面出现了大尺度的蚀坑,此时喷嘴与材料表面之间的射流靶距增大;并且蚀坑的形状不规则,腔体内的水容易附着在蚀坑表面,从而缓冲了空泡的打击作用,所以材料的质量损失程度减弱,这一作用机理与文献[20]中的结论一致。

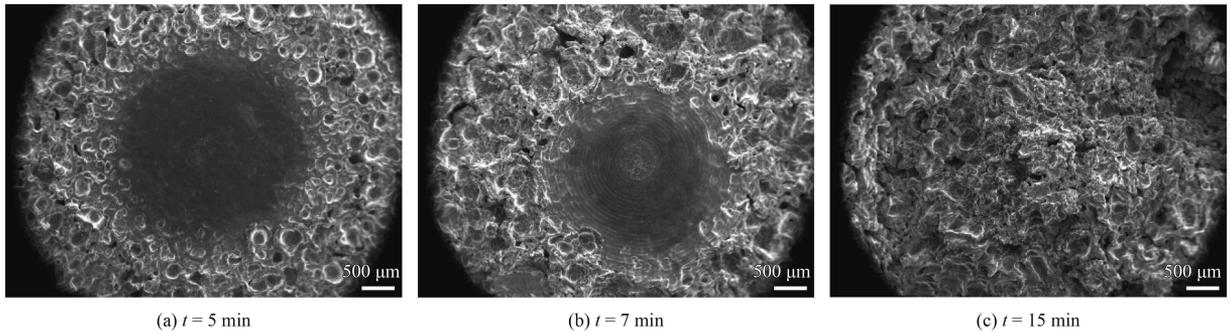


图 12 不同时刻试样表面空蚀形态

Fig.12 Microstructure of the specimen surface at different erosion time

## 5 结论

采用数值模拟和试验相结合的方法对 ASTM G134 空蚀试验台的空化和空蚀特性进行了研究,分析了淹没射流在空蚀腔内的流动和空化特性,将数值模拟结果与试验获得的试样表面特征进行了关联分析,得到以下主要结论:

(1) 在空蚀腔内,环状空化区在喷嘴出口处生成,而后空化区随着射流发展而迁移至试样表面。射流轴线附近的区域为高速区,其与周围水之间的相互作用弱,自射流轴线沿径向向外,速度迅速衰减而出现较高的速度梯度,速度梯度是引发射流空化的根本原因。

(2) 数值模拟结果表明,在试样表面上,速度梯度引起的高涡量区呈现圆环形,但正对射流中心的区域空化程度很弱,这是由于射流冲击试样表面引起的较高压强所致,因此试样表面的空化区呈环形。空蚀试验初期结果与数值模拟结果一致。

(3) 随着空蚀的持续,试样的累积质量损失不断增大,试样表面的空蚀从环形区域扩散至试样表面的中心区,试样表面的粗糙程度加剧,大的蚀坑数量增多。同时,试样的累积质量损失率经历了从持续增大到趋于稳定的过程,这与试样表面的粗糙不平引起的靶距增加和试样表面的液膜对空化泡溃灭的缓冲作用有关。

## 参考文献

- [1] ROOHI E, PENDAR M R, RAHIMI A. Simulation of three-dimensional cavitation behind a disk using various turbulence and mass transfer models[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(1): 542-546.
- [2] KANG C, OPARE W, LIU M Y. Cavitation strengthening of curved blades with submerged waterjet: A preliminary experimental investigation[J]. *Materials Science & Engineering*, 2018, 322(3): 022033.
- [3] PENG K W, TIAN S Z, LI G S, et al. Cavitation in water jet

- under high ambient pressure conditions[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2017, 89: 9-18.
- [4] ASTM Standard G134-95. Standard test method for erosion of solid materials by a cavitating liquid jet[M]. USA: Annual Book of ASTM Standards, 2010: 558-571.
- [5] LIU H X, SHAO Q M, KANG C. Flow characteristics and cavitation effect of the submerged water jet discharged from a central-body nozzle[J]. *World Journal of Engineering & Technology*, 2014, 2(4): 281-288.
- [6] MOUVANAL S, CHATTERJEE D, BAKSHI S, et al. Numerical prediction of potential cavitation erosion in fuel injectors[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2018, 104: 113-124.
- [7] HE C X, LIU Y Z, YAVUZKURT S. Large-Eddy simulation of circular jet mixing: lip- and inner-ribbed nozzles[J]. *Computers & Fluids*, 2018, 168: 245-264.
- [8] LI D, KANG Y, DING X L, et al. Effects of area discontinuity at nozzle inlet on the characteristics of self-resonating cavitating waterjet[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(4): 813-824.
- [9] MARTINOVIĆ S, VLAHOVIĆ M, DOJČINOVIĆ M, et al. Comparison of cavitation erosion behavior of cordierite and zircon based samples using image and morphological analyses[J]. *Materials Letters*, 2018, 220: 136-139.
- [10] ZOU J, ZHU Y, PAN M, et al. A study on cavitation erosion behavior of AlSi10Mg fabricated by selective laser melting (SLM)[J]. *Wear*, 2017, 376-377: 496-506.
- [11] KANG C, LIU H X, SOYAMA H. Estimation of aggressive intensity of a cavitation jet with multiple experimental methods[J]. *Wear*, 2018, 394-395: 176-186.
- [12] 禹言芳, 李春晓, 孟辉波, 等. 不同形状喷嘴的射流流动与卷吸特性[J]. *过程工程学报*, 2014, 14(4): 549-555.
- YU Y F, LI C X, MENG H B, et al. Jet flow and entrainment characteristics of nozzles of different shapes[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2014, 14(4): 549-555 (in Chinese).
- [13] LI T, WANG S P, LI S, et al. Numerical investigation of an underwater explosion bubble based on FVM and VOF[J]. *Applied Ocean Research*, 2018, 74: 49-58.
- [14] SOYAMA H, TAKAKUWA O. Enhancing the aggressive strength of a cavitating jet and its practical application[J]. *Journal of Fluid Science & Technology*, 2011, 6(4): 510-521.
- [15] ZHANG H H, CHEN Z H, GUO Z Q, et al. Numerical investigation on the three-dimensional flow characteristics of unsteady subsonic elliptic jet[J]. *Computers & Fluids*, 2018, 160: 78-92.
- [16] LI J N, ZHANG J M, PENG Y. Characterization of the mean velocity of a circular jet in a bounded basin[J]. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2017, 18(10): 807-818.
- [17] LIU H X, KANG C, ZHANG W, et al. Flow structures and cavitation in submerged waterjet at high jet pressure[J]. *Experiment Thermal and Fluid Science*, 2017, 88: 504-512.
- [18] 张欣玮, 汤积仁, 卢义玉, 等. 淹没条件下水射流涡旋特性大涡模拟及实验研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015(3): 98-104.
- ZHANG X W, TANG J R, LU Y Y, et al. Large eddy simulation and experimental study on vortex characteristics of water jet in submerged condition[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2015(3): 98-104 (in Chinese).
- [19] FUJISAWA N, FUJITA Y, YANAGISAWA K, et al. Simultaneous observation of cavitation collapse and shock wave formation in cavitating jet[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2018, 94: 159-167.
- [20] SOYAMA H, KUMANO H. The fundamental threshold level-a new parameter for predicting cavitation erosion resistance[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2002, 30(5): 421-431.