



## 缩放型喷嘴空化流动特性的数值分析

陈松平<sup>1</sup>, 李伟<sup>1,2\*</sup>, 张文全<sup>1</sup>, 胡敬宁<sup>1</sup>, 杨勇飞<sup>3</sup>, 刘明江<sup>1</sup>

(1. 江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏大学镇江流体工程装备技术研究院, 江苏 镇江 212009; 3. 南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019)



陈松平

**摘要:** 为研究空化射流结构及剪切空泡的形成演化, 文中采用 RANS-LES 混合模型方法对一种缩放型喷嘴的空化水射流进行数值模拟计算, 对比分析了不同扩张角喷嘴对射流流场的影响以及空泡初生阶段其形态、速度、湍动能等物理量的变化规律。计算结果发现: 喷嘴扩张角对空化射流影响较大, 当扩张角为 60° 时其空化性能更优; 由于空化射流速度非常高, 射流剪切层内存在较大的速度梯度, 两侧流体发生频繁的能量交换并产生许多旋涡结构; 空化现象最早发生在喷嘴喉管处并逐渐向扩张段及喷嘴出口附近运动发展, 空化程度不断增大, 不同时刻径向截面内的各参数均沿轴心对称分布, 空泡形态呈圆环状, 并随着时间推移圆环面积逐渐增大。研究结果对于提高空化水射流性能、拓宽空化水射流应用范围、揭示空化水射流特性等方面具有一定的应用价值及指导作用。

**关键词:** 空化射流; 数值计算; 旋涡; 喷嘴; 剪切空泡

**中图分类号:** S277.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2023)03-0275-06

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-8530.20.0350

陈松平, 李伟, 张文全, 等. 缩放型喷嘴空化流动特性的数值分析[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(3): 275-280, 287.

CHEN Songping, LI Wei, ZHANG Wenquan, et al. Numerical analysis of shear cavitation flow characteristics of convergent-divergent nozzles [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2023, 41(3): 275-280, 287. (in Chinese)

## Numerical analysis of shear cavitation flow characteristics of convergent-divergent nozzles

CHEN Songping<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Wenquan<sup>1</sup>, HU Jingning<sup>1</sup>, YANG Yongfei<sup>3</sup>, LIU Mingjiang<sup>1</sup>

(1. National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. Institute of Fluid Engineering Equipment Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212009, China; 3. School of Mechanics Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China)

**Abstract:** In order to study the structure of the cavitation jet and the evolution of the formation of shear cavitation bubbles, the RANS-LES mixed method was used to numerically calculate the cavitation water jet with a scaled nozzle. The effects of different diffusion angle nozzles with different expansion angles on the jet flow field were compared and analyzed, as well as the patterns of variation of physical quantities such as vacuole morphology, velocity and turbulent kinetic energy during the initial stage of cavitation growth. The results show that the nozzle expansion angle has a significant effect on the cavitation jet, and cavitation performance is better when the diffusion angle is 60°. Because of the very high cavitation jet velocity, there is a large velocity gradient within the jet shear layer, and the fluids

收稿日期: 2020-12-16; 修回日期: 2021-04-22; 网络出版时间: 2023-02-21

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20230220.1628.022.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1512405); 国家自然科学基金资助项目(51679111); 江苏省“333 高层次人才培养工程”科研资助项目; 江苏省“一带一路”创新合作项目(BZ2020068); 江苏高校优势学科建设工程项目; 江苏省现代农业装备与技术协同创新中心项目(4091600014)

第一作者简介: 陈松平(1995—), 男, 四川泸州人, 硕士研究生(songpingchen@126.com), 主要从事流体机械及工程研究。

通信作者简介: 李伟(1979—), 男, 河南信阳人, 研究员, 博士生导师(lwjiangda@ujs.edu.cn), 主要从事流体机械及工程研究。

on both sides exchange energy and generate many vortex structures. The cavitation phenomenon first occurs at the nozzle throat and gradually moves towards the diffusion section and near the nozzle outlet, and the degree of cavitation is increasing. At different moments, the parameters in the radial section are symmetrically distributed along the axis. The vapor pattern is circular ring and the area of the circular ring gradually increases in size over time. The research results have certain application value and guiding effect for improving the performance of cavitation water jet, broadening the application range of cavitation water jet, and revealing the characteristics of cavitation water jet.

**Key words:** cavitation jet; numerical simulation; vortex; nozzle; shear cavitation

空化现象广泛存在于日常生活中,当液体局部压力低于其所处温度的饱和蒸汽压时,空化就会发生并产生空泡,当压力升高时这些空泡就会发生溃灭并产生巨大能量,空化射流就是将这些空泡溃灭产生的巨大能量输送到构件表面造成强烈冲击的连续射流。空化水射流具备高效、清洁、成本低廉等优点,广泛应用于工业切割、废物清洗、表面强化等工业领域<sup>[1]</sup>,在国民经济中发挥着重要作用。

喷嘴是空化射流的核心部件,对射流空化性能有着至关重要的作用。近些年来,国内外学者们已经针对空化喷嘴进行了大量研究,李登等<sup>[2]</sup>研究了喷嘴内壁粗糙度对射流性能的影响,建立了粗糙度、入口压力、靶距同射流轴心压力峰值的数学模型。剪切型空化喷嘴具有空化性能强、结构简单等优点,应用较为广泛。姚立明等<sup>[3]</sup>采用数值计算方法对比分析了缩放形、锥形、收缩形、收缩-扩张形 4 种剪切型空化喷嘴的空化性能,发现了缩放型喷嘴由于出口扩散角的存在加剧了射流与周围流体间的剪切作用,更易发生空化。文献[4]对缩放型喷嘴进行试验,优化了结构参数,并得出最佳量纲一化冲蚀靶距。

空化射流中的空化行为较为复杂,具有高速、高压以及相变等物理特征。由此可见,掌握空化射流流场特性及空化特性对空化射流技术的发展有着重要意义。文献[5]采用高速摄影拍摄淹没空化射流试验,讨论了空泡云周期性脱落的机理,研究发现空泡云具有产生-发展-脱落-溃灭的周期性。SATO 等<sup>[6]</sup>还利用高速摄影相机从垂直方向上对射流进行拍摄,观察到空泡云冲击材料表面时扩散溃灭的过程,发现空泡到达构件表面溃灭时呈圆环状分布。

由于试验中难以捕捉到空泡运动的细节,无法清晰地观察空化射流的内部流动情况,而随着计算流体力学的发展应用,数值模拟方法具有直观反应流场形态等优点。张欣玮等<sup>[7]</sup>采用数值计算方法对

淹没式水射流的涡量场进行模拟预测,发现了喷嘴出口产生许多点旋涡并随射流运动卷吸扩散。PENG 等<sup>[8]</sup>使用了一种可压缩多相流模型,用简化后的 Rayleigh-Plesset 方程预测空泡体积分数及其周期性脱落过程,与试验结果吻合较好。此外,数值计算结果还被用于喷嘴形状结构优化<sup>[9-10]</sup>。由此可见,数值模拟方法已经成为研究空化射流流动特征的主要方法之一。

文中采用数值计算方法对缩放型喷嘴空化射流流场进行模拟,为节省计算资源,首先采用二维计算方法分析出口扩张角度对空化性能的影响,其次采用三维计算方法预测剪切空泡的形成演变过程。

## 1 模型建立

### 1.1 物理模型

研究模型为缩放型喷嘴<sup>[5]</sup>,其结构主要由收缩段、圆柱段以及扩张段组成,如图 1 所示。缩放型喷嘴主要参数包括收缩角  $\alpha = 13.5^\circ$ 、收缩段长度  $L_1 = 5 \text{ mm}$ 、圆柱段长度  $L_2 = 4 \text{ mm}$ 、圆柱段直径  $d = 1 \text{ mm}$ 、扩张段长度  $L_3 = 4 \text{ mm}$  以及扩张角  $\beta = 40^\circ$ 。

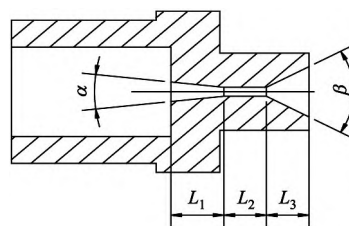


图 1 缩放型喷嘴物理模型  
Fig.1 Model of convergent-divergent nozzle

为防止静水域流态干扰到喷嘴内部及其出口附近的流动结构,静水计算域范围应较大。为节省计算资源,建立射流流场的二维模型。流场入口为压力入口,分别为喷嘴压力入口  $p_{in1}$  以及静水域压力入口  $p_{in2}$ ,结合实际情况,喷嘴压力入口设置为  $8 \text{ MPa}$ ,静

水域表面同大气直接接触,静水域压力入口设置为0;流场出口 outlet 为压力出口,设置为0;其他边界条件设置为壁面条件 wall,整个计算过程的操作压力设置为一个大气压,即  $1.01 \times 10^5$  Pa.

1.2 数学模型

1) 多相流模型.文中计算的流场是气液多相流且气相、液相之间相互混合,故采用 Mixture 模型,假设气相与液相在单位体积内是均匀混合,且两项共用速度场与压力场,通过滑移速度方程求解两项之间的相对速度.求解混合两相动量方程,即

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m(\nabla \mathbf{v}_m + \mathbf{v}_m^T)] + \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_{dr,k} \mathbf{v}_{dr,k} \right), \quad (2)$$

上述式中:  $\mathbf{v}_m$  为质量平均后的速度;  $\rho_m$  为混合相密度,  $\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$ ;  $\mu_m$  为混合相黏度,  $\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k$ ;  $n$  为相数;  $\mathbf{F}$  为体积力;  $\mathbf{v}_{dr,k}$  为次相  $k$  的滑移速度.

2) 空化模型.由文献 [11] 可知,Zwart-Gerber-Belamri (ZGB) 空化模型具有较高精度和收敛性.ZGB 模型忽略了二阶导数项、气泡表面张力,得到质量传递式为

$$R_c = F_{vap} \frac{3\alpha_{nuc}(1 - \alpha_v)\rho_v}{R_b} \sqrt{\frac{2(p_{sat} - p)}{3\rho_l}}, \quad (3)$$

$$R_c = F_{cond} \frac{3\alpha_v \rho_v}{R_b} \sqrt{\frac{2(p - p_{sat})}{3\rho_l}}, \quad (4)$$

上述式中:  $F_{cond}$  为凝结系数;  $\alpha_{nuc}$  气核体积分数;  $F_{vap}$  蒸发系数;  $R_b$  为气泡半径.

3) 湍流模型.因为空化射流流场离散分布着大量旋涡,常用的 RANS 模型注重捕捉流场平均信息,对流场细节方面捕捉能力不足.LES 模型注重捕捉流场细节,但又十分依赖于网格质量,需要大量的计算成本从而阻碍了 LES 模型的应用.因此,RANS-LES 混合模型具有既能提高流场求解精度的同时又能降低网格数过大的问题,文中采用的 RANS-LES 混合方法是在 Transition SST 模型基础上选择 SBES 模型.

图2为进口压力 8 MPa 时模拟得到的空泡形态,与相同条件下的试验结果进行对比,发现该混合模型的空泡分布同试验结果较为接近,说明该混合模型可以用于预测空化射流流场分布情况.

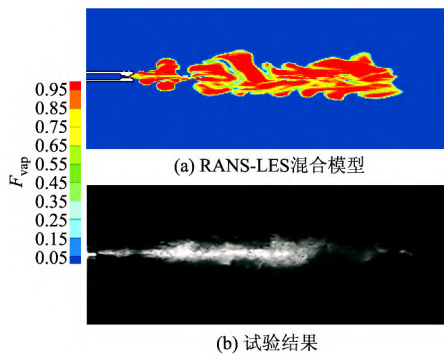


图2 计算结果与试验结果对比  
Fig.2 Comparisons of calculation results with experimental results

1.3 网格无关性验证

利用 ICEM 软件对流场进行结构化网格划分,对喷嘴内部网格进行细化以及加密处理,从喷嘴出口至下游及边界处的网格节点距离平滑过渡并逐渐增大,并对网格进行无关性验证,参考喷嘴出口处轴心速度随网格数的变化,如表 1 所示,表中  $N$  为网格总数,  $v$  为喷嘴出口轴心速度.

表 1 网格无关性验证  
Tab.1 Validation of mesh independence

方案	$N$	$v/(m \cdot s^{-1})$
1	261 000	116.9
2	352 000	121.6
3	457 000	127.4
4	558 000	127.9
5	652 000	128.1

当网格数超过 457 000 时,喷嘴出口处轴心速度变化不大,故最终确定网格数为 457 000,网格划分如图 3 所示.



图3 计算域网格  
Fig.3 Mesh of computational domain

2 数值结果分析

2.1 不同扩张角对空化射流的影响

文献 [3] 研究表明含扩张段喷嘴的空化性能优于不含扩张段喷嘴.因此,文中对不同扩张角的缩放

型喷嘴进行研究,对比分析不同扩张角对射流流场的影响.图 4 为不同扩张角的缩放型喷嘴射流流场的空泡分布,观察到空化现象从扩张段产生且沿壁面呈对称分布,并且不同扩张角下流场空泡分布情况不同.当扩张角  $\beta=40^\circ$  时,空泡形态轴向长度约为 45 mm,空泡从喷嘴出口展现出较好的集束性;当  $\beta=60^\circ$  时,空泡形态轴向长度延伸至 55 mm,并且空泡面积也明显增大,观察喷嘴扩张段及出口附近发现空泡体积分数增大,由于喷嘴扩张角增大使得喷嘴对流体集束性减弱,但空化现象较  $\beta=40^\circ$  时得到了一定提高;当  $\beta=80^\circ$  时,空泡形态轴向分布缩短至不到 40 mm,空泡分布面积也明显减小并弱于  $\beta=40^\circ$  时空泡面积,观察喷嘴扩张段及出口附近的空泡分布,发现喷嘴对空泡集束性进一步减弱并且空化现象明显减弱.当高速流体从喷嘴射出与外围静水之间产生强烈的剪切作用从而发生空化,喷嘴扩张段的存在令高速流体对外围静水卷吸加剧流体间混合作用.当扩张角增大时增强了对周围流体卷吸作用从而加强了剪切效果,但当扩张角过大时会减弱喷嘴对射流的集束性并影响空泡发展过程,对比上述 3 种不同扩张角的缩放喷嘴空泡分布情况,认为当  $\beta=60^\circ$  时空化性能最强.

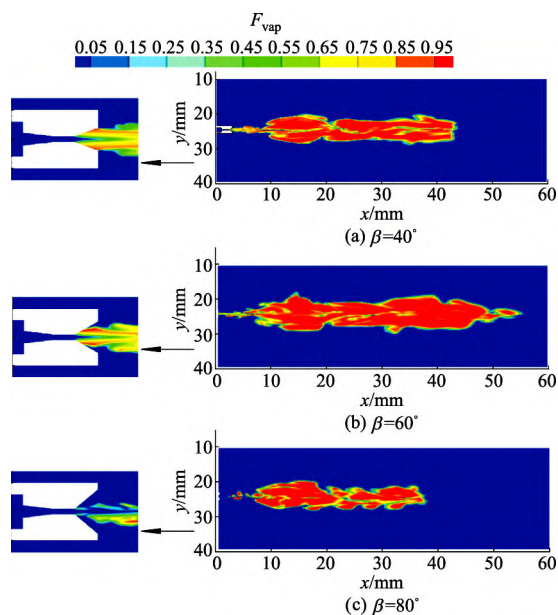


图 4 不同扩张角下的空泡分布  
Fig.4 Cavity distribution at different diffusion angles

观察不同扩张角喷嘴出口处速度分布,如图 5 所示.射流经过喷嘴收缩段进入圆柱段后过流断面面积减小,射流速度达到最大值均超过 120 m/s,而后射流进入扩张段过流面积逐渐增大,射流速度分布区域也逐渐增大最终离开喷嘴.当  $\beta=40^\circ$  时,整个

扩张角部分速度几乎都超过 100 m/s 并且射流的集束性较好;当  $\beta=60^\circ$  时,同样喷嘴扩张角大部分区域的速度都超过 100 m/s 并且射流集束性良好,但仔细观察扩张角出口部分壁面附近速度分布呈负值(即速度方向与射流方向相反),这是由于少量外围流体被扩张角卷吸进入喷嘴;当  $\beta=80^\circ$  时,速度超过 100 m/s 部分面积明显小于前两者情况,射流集束性也明显下降,观察喷嘴扩张角部分发现扩张角部分速度负值区域增大,说明更多流体被卷吸进入到喷嘴扩张角.对比上述 3 种不同扩张角喷嘴速度分布情况,  $40^\circ$  扩张角和  $60^\circ$  扩张角速度分布区别不大,并且发现  $60^\circ$  喷嘴扩张角内出现速度负值,这有利于空化现象的产生.当喷嘴扩张角继续扩大到  $80^\circ$  时,扩张角部分对周围流体的卷吸效果增强,但射流轴向速度分布也明显较小,射流速度集束性明显减弱,这是因为扩张角过大会令喷嘴对射流约束作用减弱,并且过多流体卷吸进入喷嘴会削弱射流速度,从而影响喷嘴速度性能.

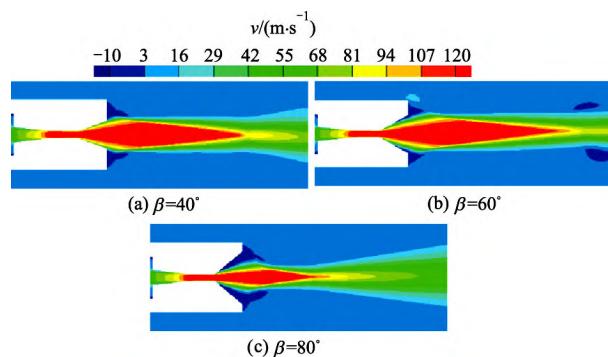


图 5 不同扩张角下的射流速度  
Fig.5 Velocity at different diffusion angles

## 2.2 剪切空化射流中空泡的形成与扩散

基于不同扩张角度对射流流场的分析,对空化射流速度以及空泡体积分数进行模拟预测,进一步研究空化射流流场细节及剪切空泡的演化过程.在二维模型的基础上建立射流三维流场,三维计算的边界条件与二维计算一致.

由于剪切空化射流速度较高与周围静水发生剧烈的剪切作用,射流边界层内存在复杂的物理现象.图 6 为速度流场分布图,射流最高速度超过了 120 m/s.基于混合模型的特点,捕捉到更多流场细节,对喷嘴出口附近流线分布进行观察,射流在极小厚度的剪切层内与周围静水形成了极大的速度梯度,2 股流体之间发生大量的能量交换并形成旋涡结构,旋涡结构伴随射流向下游运动并且各个微

小旋涡之间发生合并逐渐增大,故射流速度场也会发生扩散.

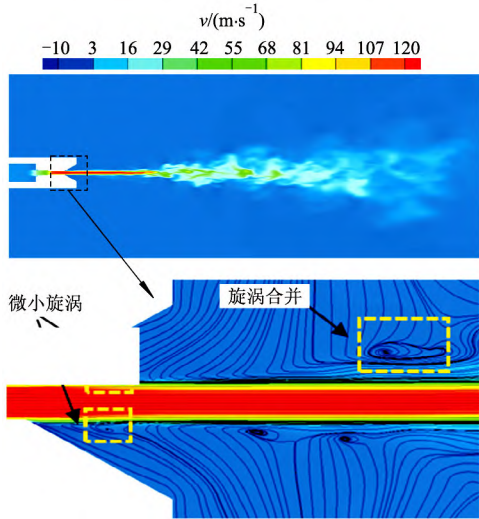


图 6 射流速度场及流线分布  
Fig.6 Velocity flow field and streamline distribution

图 7 为空化初生阶段空泡及旋涡的演化过程. 随着时间推移,空化面积逐渐增加并且从喷嘴圆柱段逐渐向喷嘴扩张段及喷嘴出口移动.结合对产生空化区域的移动规律分析,发现在喷嘴扩张段及喷嘴出口附近形成 2 个沿轴心线分布的旋涡,这是因为从圆柱段射出的高速射流与静水之间产生强烈的剪切作用,在剪切应力和反向压差作用下产生旋涡.在  $T=500\Delta T$  时观察到在喷嘴出口附近存在回流并且空泡云开始发生凹陷脱落现象,这同文献 [12] 中观察到的回流现象相似,说明回流是空泡脱落的一种重要原因.

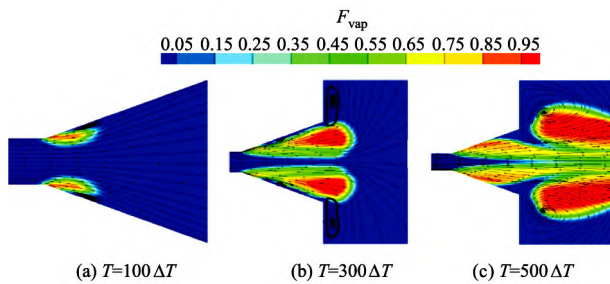


图 7 空泡初生阶段空泡变化图  
Fig.7 Cavitation change diagram at initial stage of cavitation

以射流轴心为  $X$  轴,射流方向为  $X$  轴正方向,喷嘴轴心出口处为坐标原点建立  $XYZ$  三维坐标系,使用  $YZ$  界面分别截取  $X=-4.0\text{ mm}$ ,  $X=-1.5\text{ mm}$  以及  $X=2.0\text{ mm}$  3 个位置获得 3 个径向截面  $A, B, C$ ,并分别得到喷嘴圆柱段、扩张段以及喷嘴出口附近的径向流场信息分布情况.在空化初生时刻,空化现

象主要发生在喷嘴扩张段入口附近,如图 8 所示.不同时刻空泡在径向截面内呈圆环状分布,并且空泡呈圆环形态向下游运动,这与空化射流冲蚀试验在工件表面上形成的圆环凹坑形状相似.研究发现随着时间推移,射流空化强度逐渐增强并且向下游运动,径向截面内空泡圆环宽度越来越大,圆环面积也逐渐增大.

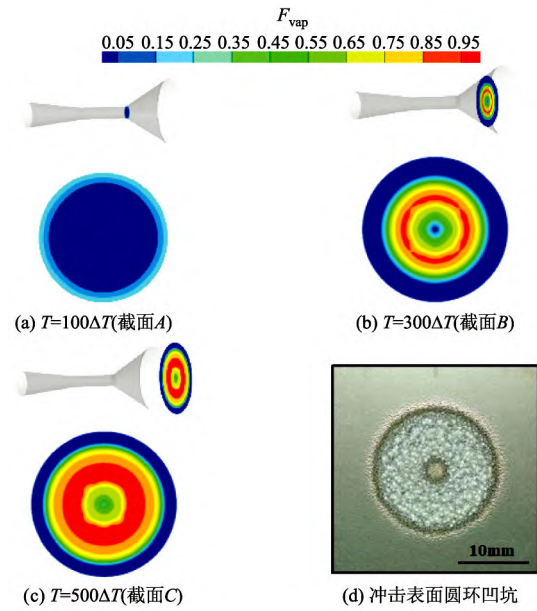


图 8 不同时刻径向截面空泡体积分数  
Fig.8 Volume fraction of cavitation in radial cross section at different time

在上述位置径向圆截面内截取一条过圆心的直线,获得压力  $p$ 、速度  $v$ 、空泡体积分数  $\alpha_v$  以及湍动能  $TKE$  等物理量在不同时刻的分布曲线,如图 9 所示,图中  $l$  为径向距离.不同截面内的上述物理量均沿圆心呈对称分布,观察各截面内压力分布发现射流中心压力逐渐减小,低压区域面积不断扩大,并且低压区域从射流两侧逐渐向截面圆心靠近,最终令圆心位置处发生空化,距离圆心越来越远位置处的压力逐渐增大.观察空泡体积分数分布曲线可知,空泡体积分数随时间和位置的推移逐渐增大,空化面积逐渐增强,并且空化区域逐渐向截面中心及圆环外侧扩大,当  $T=300\Delta T$  时,空泡体积分数曲线开始呈“双驼峰形”分布,即除了截面圆心位置空泡体积分数较小以外,距离圆心越来越远位置处的空泡体积分数也逐渐减小,这同低压区域的分布规律相同.各截面内的湍动能分布趋势和空泡体积分数趋势相同,都是在  $T=300\Delta T$  时呈现“双驼峰形”分布.由各截面的速度分布曲线可以观察到当速度衰减时,空泡体积分数及湍动能开始增加,这是因

为流体间的强剪切作用加剧了流体间能量的相互交换在产生剪切空化的同时减低了流体速度。

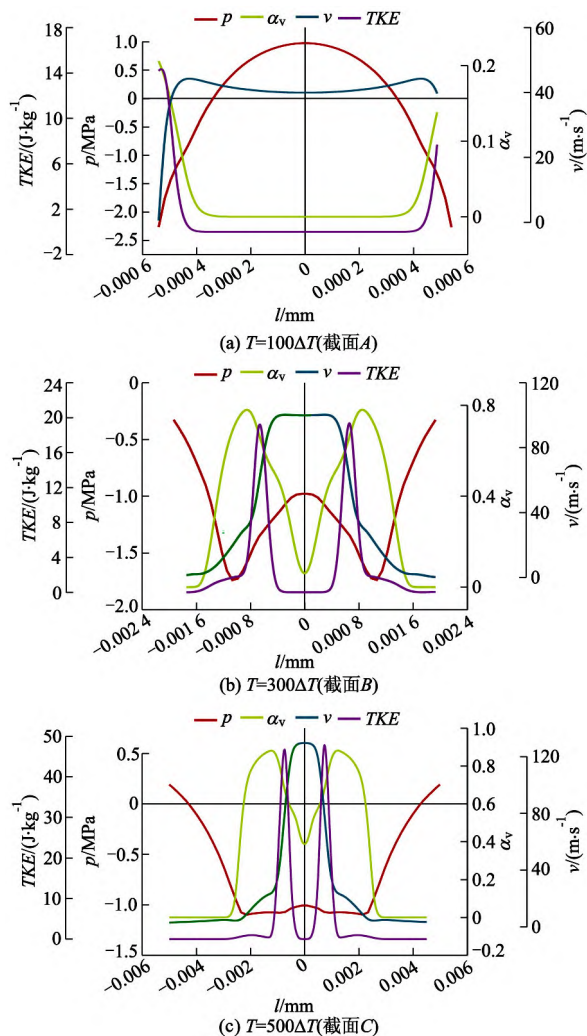


图 9 不同截面性能参数变化规律

Fig.9 Variation of performance parameters of different sections

### 3 结 论

1) RANS-LES 混合模型能够捕捉到更多的流场细节,并且计算获得的空泡云形态与试验结果更为相似。

2) 喷嘴扩张角的角度对空化射流流场影响较大,在  $40^\circ, 60^\circ, 80^\circ$  共 3 种扩张角度之中,当扩张角度为  $60^\circ$  时空化射流性能更优。

3) 在空化初生阶段,空化现象在喷嘴圆柱段处开始发生并向下游运动发展,空化强度逐渐增强。在射流剪切层中分布着许多小尺度旋涡,这些旋涡也会向下游运动并且伴随着能量交换扰动流场稳定。

4) 径向截面的空泡形态呈圆环状分布,并且随

着时间推移,空泡面积向圆心处及圆环外侧逐渐扩大,在  $T=300\Delta T$  时,径向截面内的空泡体积分数和湍动能均开始呈“双驼峰形”分布。

### 参考文献 (References)

- [1] YANG Y, LI W, SHI W, et al. Experimental study on the unsteady characteristics and the impact performance of a high-pressure submerged cavitation jet [J]. Shock and vibration, 2020( 11) : 1-15.
- [2] 李登, 李晓红, 康勇, 等. 风琴管喷嘴内表面粗糙度对高压射流特性的影响试验研究 [J]. 机械工程学报, 2015, 51( 17) : 169-176.  
LI Deng, LI Xiaohong, KANG Yong, et al. Experimental investigation on the influence of internal surface roughness of organ pipe nozzle on the characteristics of high pressure jet [J]. Journal of mechanical engineering, 2015, 51( 17) : 169-176. (in Chinese)
- [3] 姚立明, 赵怡, 李大尉, 等. 几种空化喷嘴流场的数值模拟 [J]. 节能技术, 2015, 33( 1) : 20-24.  
YAO Liming, ZHAO Yi, LI Dawei, et al. Research on the shape of cavitating spray head [J]. Energy conservation technology, 2015, 33( 1) : 20-24. (in Chinese)
- [4] YANG Y, LI W, SHI W, et al. Experimental study on submerged high-pressure jet and parameter optimization for cavitation peening [J]. Mechanika, 2020, 26 ( 4) : 346-353.
- [5] 李伟, 张文全, 施卫东, 等. 缩放型喷嘴空化射流空泡云演化规律的试验研究 [J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38( 6) : 547-552.  
LI Wei, ZHANG Wenquan, SHI Weidong, et al. Experimental study on dynamic change of cavitation jet bubble under convergent-divergent nozzle [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2020, 38 ( 6) : 547-552. (in Chinese)
- [6] SATO K, SUGIMOTO Y, OHJIMI S. Pressure-wave formation and collapses of cavitation clouds impinging on solid wall in a submerged water jet [C] // Proceedings of the 7th Int. Symposium on Cavitation, 2009: 209-214.
- [7] 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, 39( 3) : 98-104.  
ZHANG Xinwei, TANG Jiren, LU Yiyu, et al. Large eddy simulation and experimental study on vortex characteristics of water jet in submerged condition [J]. Journal of China University of Petroleum( edition of natural science), 2015, 39( 3) : 98-104. (in Chinese)

(下转第 287 页)

102-106.

- [7] 孙长周,于新海,宗新,等.内部湍流作用下调节阀外噪声的预测[J].工程热物理学报,2017,38(9):1866-1871.  
SUN Changzhou, YU Xinhai, ZONG Xin, et al. Prediction of noise induced by turbulent flow in a control valve[J]. Journal of engineering thermophysics, 2017, 38(9): 1866-1871. (in Chinese)
- [8] NGUYEN-NGOC H, PHUNG-VAN P, DANG B L, et al. Static and dynamic analyses of three-dimensional hollow concrete block revetments using polyhedral finite element method[J]. Applied ocean research, 2019, 88: 15-28.
- [9] JIN Zhiqiang, GAO Zhixin, QIAN Jinyuan, et al. A para-

metric study of hydrodynamic cavitation inside globe valves[J]. Journal of fluids engineering, 2018, 140: 031208.

- [10] SCHNERR G H, SAUER J. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics [C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Multi-phase Flow, 2001: 1-12.
- [11] MARGOT X, HOYAS S, GIL A, et al. Numerical modelling of cavitation: validation and parametric studies[J]. Engineering applications of computational fluid mechanics, 2012, 6(1): 15-24.

(责任编辑 谈国鹏)

(上接第280页)

- [8] PENG G, SHIMIZU S, FUJIKAWA S. Numerical simulation of cavitating water jet by a compressible mixture flow method[J]. Journal of hydrodynamics (Ser. B), 2011, 6(4): 499-509.
- [9] 戚美,王立夫,陈庆光,等.双腔室自激振荡脉冲喷嘴空化射流的数值模拟[J].排灌机械工程学报, 2020, 38(5): 457-461.  
QI Mei, WANG Lifu, CHEN Qingguang, et al. Numerical simulation of cavitating jet in dual chamber self-oscillation pulse nozzle[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2020, 38(5): 457-461. (in Chinese)
- [10] 裴娜,杨华,刘联胜,等.喷孔结构对双旋流气泡雾化喷嘴喷雾特性的影响[J].流体机械, 2021, 49(9): 1-5, 12.  
PEI Na, YANG Hua, LIU Liansheng, et al. Effect of orifice structure on spray characteristics of double swirl

effervescent atomizer[J]. Fluid machinery, 2021, 49(9): 1-5, 12. (in Chinese)

- [11] 曹东刚,何国强,潘宏亮,等.三种空穴模型在可调汽蚀文氏管数值模拟中的对比研究[J].西北工业大学学报, 2013, 31(4): 596-601.  
CAO Donggang, HE Guoqiang, PAN Hongliang, et al. Comparative study of three cavitation models in numerical simulation of adjustable cavitation venturi[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(4): 596-601. (in Chinese)
- [12] HAYASHI S, SATO K. Unsteady behavior of cavitating waterjet in an axisymmetric convergent-divergent nozzle: high speed observation and image analysis based on frame difference method[J]. Journal of flow control, measurement & visualization, 2014, 2(3): 44-50.

(责任编辑 谈国鹏)