

文章编号: 1000-4750(2012)04-0237-07

# 回转体匀速垂直入水早期空泡数值模拟研究

何春涛, 王 聪, 闵景新, 金大桥, 黄海龙

(哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 基于 VOF (Volume of Fluid) 方法和有限体积法求解气、水两相流动的 RANS 方程, 并结合动网格技术, 对物体垂直入水空泡流动进行了数值计算研究。通过对球体垂直入水早期空泡形态进行数值计算, 并将计算结果与 May A 理想空泡模型拟合结果进行对比分析, 二者具有较好的一致性, 验证了数值计算方法的有效性。在此基础上, 进一步研究了 150° 锥角回转体垂直入水空泡生成过程, 空泡壁面运动特性和空泡表面闭合特性, 给出了垂直匀速入水空泡形态随时间变化规律, 空泡壁面随入水过程时间变化运动规律, 以及空泡表面闭合时间与入水速度之间的关系。

**关键词:** 垂直入水; VOF; 入水早期空泡; 表面闭合; 圆锥

**中图分类号:** TV131.2 **文献标志码:** A

## NUMERICAL SIMULATION OF EARLY AIR-CAVITY OF CYLINDER CONE WITH VERTICAL WATER-ENTRY

HE Chun-tao, WANG Cong, MIN Jing-xin, JIN Da-qiao, HUANG Hai-long

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** Computational simulation of the water-entry cavity following the water-entry is carried out. During the computation, the Navier-Stokes equations are solved with the discretization of Finite-Volume Method, and VOF (Volume of Fluid) and dynamic mesh method are used for the multiphase flow and the movement of the water-entry body, respectively. The computation results of the air-cavity shape of water-entry of sphere are directly compared with the 'ideal cavity' proposed by A. May, showing that the computation methodology properly captures the key features in the early stage of constant speed vertical water-entry cavity, and in particular gives a reasonable prediction of the outline of air-cavity in the early stage of water-entry, and of the history of the maximum radius of the air-cavity. At the same time the water-entry cavity history and air-cavity wall kinematics of the inverted truncated cone of 150 degree in the early stage life of the water-entry are investigated by computation, and the results show that the history of air-cavity wall movement following the water-entry body with different outline features are similar. And at the end of this paper the time of the surface closure of the air-cavity of the inverted truncated cone of 150 degree are also investigated.

**Key words:** vertical water-entry; VOF; air-cavity; surface closure; inverted truncated cone

物体入水问题早在 19 世纪末 20 世纪初就开始了大量的相关试验研究<sup>[1-2]</sup>, 尤其是对物体入水所

引起特有的空泡现象进行了详细的研究。1929 年 Von Karman<sup>[3]</sup>发表了关于飞机在水面上降落和滑

收稿日期: 2010-07-12; 修改日期: 2010-09-25

通讯作者: 何春涛(1982-), 男, 四川南充人, 博士生, 从事超空泡流体力学理论及数值模拟研究(E-mail: hechuntao2006@126.com).

作者简介: 王 聪(1966-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 教授, 博士, 博导, 从事流体力学、航天器动力学、振动与控制等研究

(E-mail: alanwang@hit.edu.cn);

闵景新(1982-), 男, 江西南昌人, 博士生, 从事超空泡流数值模拟及试验研究(E-mail: minjx@163.com);

金大桥(1974-), 男, 黑龙江双城人, 讲师, 博士生, 从事超空泡流体力学理论及试验研究(E-mail: jindaqiao003@163.com);

黄海龙(1976-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 工程师, 博士后, 从事超空泡流数值计算研究(E-mail: hailong\_huang@hit.edu.cn).

翔所产生的冲击力的研究成果, Whalley I A<sup>[4]</sup>在文献中描述了二战期间研制出通过在水面滑行跨越水下拦截网的炸弹, 二战过后多个国家开始研制各种导弹、空投鱼雷等入水武器<sup>[5]</sup>。Ashley<sup>[6]</sup>研究了超空泡射弹武器从空气入水时所产生的空泡现象。由于入水问题涉及到介质密度突变, 从而引发了入水空泡、撞击载荷、以及忽扑等复杂现象, 使入水问题变得更加复杂和重要。因此, 入水问题再次成为各个国家研究的热点, 并在长期的研究过程中取得了一定的研究成果, 主要表现在入水过程中空泡的生成等。

入水空泡是物体入水过程中最重要的环节之一, 并且是很难避免的现象。由于物体入水空泡涉及空气、水和入水物体三者的相互作用, 并且还受到自由液面的影响, 将增加了入水物体流体动力、水下弹道等的复杂性和不确定性因素。早期, 人们对物体入水的研究主要可分为两类: 一是以试验为主展开的各种研究; 另一方面主要是以势流理论为基础的数值计算。1897年 Worthington 和 Cole<sup>[2]</sup>使用高速照相机对球体垂直入水空泡生成过程进行了观察, 并描述了入水所引起的喷溅等物理现象。1918年, 以及1924年 Mallock<sup>[7]</sup>和 Bell<sup>[8]</sup>分别对球体入水试验所观察到的空泡形态和弹道进一步给出了定量的分析和对所产生现象的解释。1948年 May A 和 Woodhull Jean C<sup>[9]</sup>对球体垂直入水过程中阻力系数变化规律进行了研究, 并给出了球体在入水过程中阻力系数与 Reynolds 数和 Froude 数的函数关系。1948年 David Gilbarg 和 Anderson Robert A<sup>[10]</sup>对球体入水过程中空气环境压力对早期空泡的影响因素进行了试验研究, 在试验过程中环境压力变化范围 1689Pa~303975Pa, 入水速度 4.57m/s~30.5m/s, 球体直径为 6.35mm~25.4mm, 较为详细的介绍了影响空泡闭合的相关因素等。1951年 May A<sup>[11]</sup>研究了球体表面质量对入水空泡的影响, 并分析了不同表面质量球体入水时产生空泡的临界入水速度。2000年 Shi Hong-Hui<sup>[12]</sup>也再次利用高速照相机对高速入水空泡进行了试验研究。2009年前后 Tadd T Truscott 和 Alexandra H Techet<sup>[13]</sup>等人对物体入水进行了大量的实验研究, 包括对绕平行于水平面轴旋转的球体入水空泡以及旋转入水受力分析的实验研究。

由于入水空泡极易受到试验边界条件, 试验方法等因素的干扰, 因此很难重复的进行相同边界条

件的入水试验, 这使得数值计算变得更有意义。1990年陈学农<sup>[14]</sup>等人使用了时间步进法和边界积分方程方法求解了平头物体垂直及斜向入水过程。2009年 Yan Hongmei<sup>[15]</sup>等人基于细长体理论, 利用势流对底雷诺数条件下的入水空泡流体动力特性进行数值计算。2009年 Jeffrey<sup>[16]</sup>等人对憎水球体垂直入水空泡形态进行了数值计算。以上数值计算主要都是在理想流体框架下利用势流进行求解。随着计算机的发展以及数值计算方法的改进, 使得通过求解 N-S 来研究入水空泡成为可能, 将使得计算模型更加接近真实物理现象。

本文采用 VOF 多相流模型和有限体积法求解 RANS 方程, 并结合动网格技术, 对球体匀速垂直入水空泡形态特性进行了数值计算研究, 并且在本文计算过程中边界条件以及初始条件的设定参考了 May A<sup>[17]</sup>等人提出了垂直匀速入水理想空泡模型, 假设在入水前期很短的一段时间范围内入水物体匀速运行, 以及忽略重力场对空泡闭合的影响因素。并将计算结果与文献中经验公式进行了对比, 取得较好的一致性。在此基础上进一步研究、分析了 150°锥角回转体垂直匀速入水早期空泡生成过程, 空泡壁面运动特性, 以及空泡表面闭合特性。

## 1 控制方程

### 1.1 连续性方程和动量方程

VOF 模型将整个流场中的流体介质看作密度可变的单相流体, 即气、水混合物。

混合物连续性方程:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_m u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial a_g}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (a_g u_i) = 0 \quad (2)$$

式中:  $u_i$  为  $i$  方向上速度分量;  $\rho_m$  为混合物密度,  $\rho_m = (1 - a_g)\rho_l + a_g\rho_g$ , 其中  $\rho_i (i=l, g)$  分别为水和空气密度,  $a_g$  和  $1 - a_g$  分别为空气相和水相体积分数。在每个控制单元体积分内存在以下三种情况: 当  $a_g = 0$  时, 该控制单元内完全被水相所占据; 当  $a_g = 1$  时, 该控制单元内完全被气相所占据; 当  $0 < a_g < 1$  时, 控制单元内将出现气、水两相交界面。

混合物动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_m u_i u_j) =$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu_m + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3)$$

式中： $p$  为混合物压强； $\mu_m$  为混合物动力粘性系数， $\mu_m = (1 - a_g)\mu_l + a_g\mu_g$ ，其中水和空气相的粘性系数分别取在温度为  $15^\circ\text{C}$  时的值  $\mu_a = 1.79 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ， $\mu_l = 1.14 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ， $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$  为湍流粘性系数。

### 1.2 湍流模型

采用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型进行计算，湍动能  $k$  和湍能耗散率  $\varepsilon$  的输运方程分别为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho_m \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho_m \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中： $G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$  为由平均速度梯度所引起的湍动能生成项； $G_b$  为由浮力所引起的湍动能生成项，在本文中由于没有考虑重力的因素，所以该项为零； $\sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$  分别为湍动能  $k$  和湍能耗散率  $\varepsilon$  的湍流 Prandtl 数， $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ； $C_{3\varepsilon} = \tan|\mathbf{v}/\mathbf{u}|$ ，式中  $\mathbf{v}$  为平行于重力场矢量的流速分量， $\mathbf{u}$  为垂直于重力场矢量的速度分量； $C_\mu$ 、 $C_{1\varepsilon}$  和  $C_{2\varepsilon}$  均为常数其值分别为： $C_\mu = 0.09$ 、 $C_{1\varepsilon} = 1.44$  和  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ 。

## 2 数值求解

### 2.1 计算域和边界条件

由于计算入水物体在几何机构上具有轴对称的特性，为了便于计算和分析，本文采用二维轴对称模型进行计算。本文分别对球体和  $150^\circ$  锥角回转体(本文以后简称为圆锥)几何模型进行了数值计算，其中，球体直径为  $25.4\text{mm}$ ，圆锥底部直径为  $10\text{mm}$ ，其几何结构示意图如图 1 所示。

计算区域分布图如图 2 所示，球体和圆锥数值计算均采用相同的计算域分布。在数值计算中将计算域分为如图 2 所示的两部分：上半部分为空气域，

下半部分为水域。轴向方向上长度，空气域为 100 倍入水物体特征尺寸，水域为 200 倍入水物体特征尺寸；径向方向上宽度，均为 100 倍入水物体特征尺寸。空气域和水域交界面为自由液面。在初始时刻入水物体与未扰动水面刚好接触。

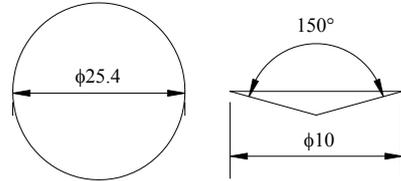


图 1 球体及圆锥几何结构示意图

Fig.1 Sketch of the sphere and inverted truncated cone

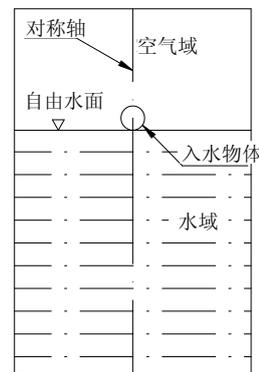


图 2 计算域分布示意图

Fig.2 Sketch of the outline and computational domain

### 2.2 数值方法

结合动网格技术，采用基于 VOF 多相流模型的有限体积法求解 RANS 方程，实现入水物体运动边界与气、水流场的耦合求解，对回转体垂直入水空泡进行数值模拟。空间离散采用二阶迎风格式，时间离散采用一阶隐式格式，在瞬态计算过程中速度压力耦合采用 PISO 算法，压力项离散采用 PRESTO! 离散格式；对流项采用 QUICK 离散格式；动量方程、湍流和耗散项采用了二阶迎风格式。自由液面几何重构采用 Geo-Reconstruct 格式。在 Geo-Reconstruct 几何重构法中，当某一控制单元完全被某一相所占据时，将使用标准插值格式计算通过控制体积各个面的通量，当网格单元处于相交界面附近时，使用几何重构进行插值。

本文通过 C 语言程序，嵌入 Fluent 用户自定义函数(UDF)定义入水物体运动速度变化规律。由于本文采用四边形网格，因此，采用动态层法来实现入水物体表面网格更新。动态层法是指通过设置模型表面网格的集合尺寸，并设置尺寸变化范围，当网格被压缩或被拉升超出设定网格尺寸时，网格被

合并或分裂出新网格层。首先指定移动边界附近的网格理想高度  $h_{ideal}$ ，网格层分裂因子  $\alpha_s$  和网格层溃灭因子  $\alpha_c$ 。当网格被拉伸时，被拉伸的网格高度  $h_i$  满足式(6)时，网格将根据指定的网格层高度分割网格；在网格被压缩时，当网格高度满足式(7)时，被压缩层网格将与其相邻网格合并。

$$h_i > (1 + \alpha_s)h_{ideal} \quad (6)$$

$$h_i < \alpha_c h_{ideal} \quad (7)$$

引入动态网格后，相当于网格按一定速度做纯对流运动，在实际的计算中应减掉网格的对流效应。因而引入动网格后控制体  $V$  对变量  $\varphi$  的统一形式的守恒方程可写为：

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho_m \varphi dV + \int_{\partial V} \rho_m \varphi (\mathbf{u} - \mathbf{u}_g) \cdot d\mathbf{A} = \int_{\partial V} \Gamma \nabla \varphi \cdot d\mathbf{A} + \int_V S_\varphi dV \quad (8)$$

式中： $\rho_m$  是流体混合物密度； $\mathbf{u}$  是流体速度矢量； $\mathbf{u}_g$  为动网格的运动速度； $\Gamma$  为扩散系数； $S_\varphi$  为标量  $\varphi$  的源项； $\partial V$  表示控制体积  $V$  的边界。

### 3 数值计算方法对比与验证

到目前为止还没有较为通用的理论用于描述入水各个阶段空泡形态的演变过程。May A<sup>[17]</sup>等人提出了垂直匀速入水理想空泡模型，并忽略了重力场对空泡的影响，假设开空泡内压力恒等于环境压力。为了便于分析，引入如图3所示垂直入水空泡圆柱坐标示意图。

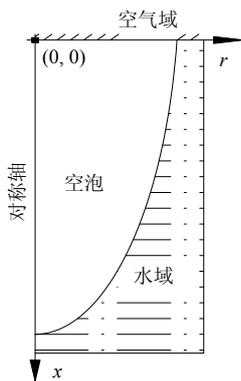


图3 空泡坐标示意图

Fig.3 Coordinate of the cavity

由于轴对称物体入水空泡具有轴对称性，为了便于计算和分析，忽略圆柱坐标中方位角的因素，将三维圆柱坐标简化为如图3所示的二维圆柱坐标系。坐标原点建立在未扰动自由液面上，径向半周与未扰动自由液面重合，竖直向下为轴向正方向。并假设物体垂直入水运动轨迹与对称轴重合，物体

从坐标原点处垂直入水。在该二维轴对称坐标系下垂直入水早期空泡的理想空泡模型为：

$$\frac{x}{\sqrt{C_D}d} = 1.716 \left( \frac{r}{\sqrt{C_D}d} \right)^2 \quad (9)$$

式中： $C_D$  为入水物体阻力系数； $d$  为入水物体特征尺寸。

根据以上理想空泡模型边界条件要求，对球体垂直入水空泡进行数值计算，并将计算结果与以上理想空泡模型进行比较。球体以 30m/s 速度从空气域垂直进入水域，空气域环境压强为 101325Pa，空气和水的密度分别为 1.225kg/m<sup>3</sup>、998.2kg/m<sup>3</sup>。其空泡生成过程如图4所示。

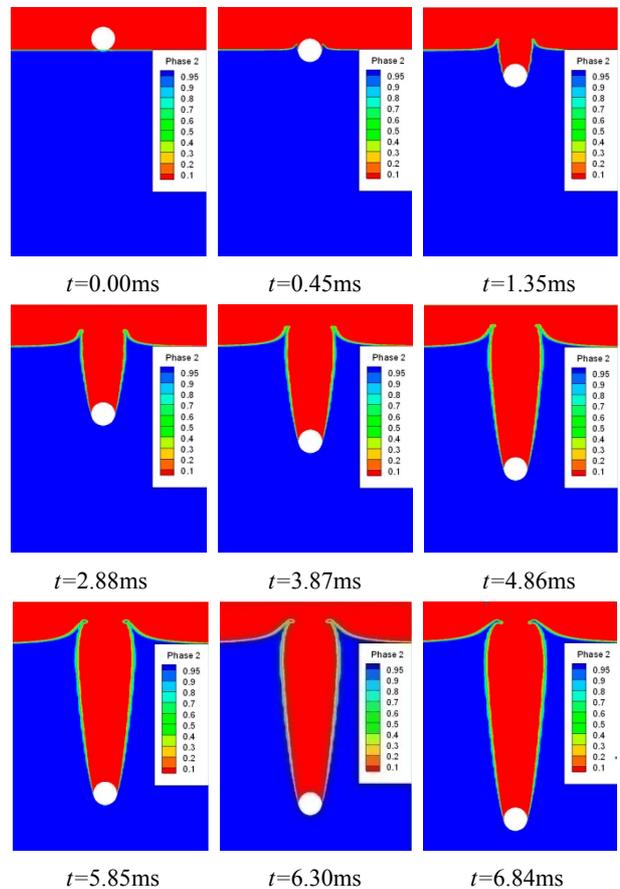


图4 球体垂直入水过程空泡示意图

Fig.4 Cavity shape of sphere vertical water entry

由图4中可以看出球体进入水域后，首先在球体后形成一个与大气相通的空泡；在球体入水处自由液面上升，高出未扰动液面；并随着球体在水中的运动，空泡在水面以下继续向下扩张。从初始时刻到  $t=0.45ms$  时空泡变化情况可以看出球体入水处的水质点沿球体圆周切线向上运动，并逐渐升高；当  $t=1.35ms$  时，可以清晰看出球体入水处水面升高形成喷溅，这种喷溅上升的过程持续较长时间

一直到  $t=4.86\text{ms}$ ，在此时刻之后，从  $t=5.85\text{ms}$  到  $t=6.84\text{ms}$  时刻期间喷溅表面张力等作用向下向中心点收缩，趋向于表面闭合并最终将空泡与空气域隔断。在入水过程中喷溅的产生是极其复杂的过程，对入水环境以及边界条件等具有较强的依赖性<sup>[16]</sup>。

将以上计算结果与式(9)理想空泡模型拟合结果进行对比。对于球体取阻力系数  $C_D=0.20$ ，并运用空泡宽度与模型半径之间的比值，以及空泡长度与模型直径之间的比值将空泡宽度与空泡长度进行无量纲化。其空泡无量纲化轮廓对比结果如图 5 所示。

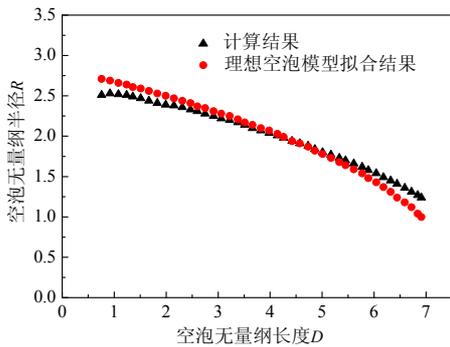


图 5 球入水空泡轮廓计算结果与经验公式对比  
Fig.5 Comparison of the computational result with ideal cavity model

由图 5 可以看出计算结果与理想空泡模型拟合结果具有较好的一致性，只是在空泡头部和尾部具有较小差异。出现以上差异是由于理想空泡模型在分离点附近与真实空泡轮廓本身存在一定误差，而在空泡尾部是由于理想空泡模型没有考虑空泡闭合，并简化了自由液面喷溅所产生的。

以上对球体垂直入水空泡形态计算结果与理想空泡模型空泡形态拟合结果进行了比较，并取得了较好的一致性。因此，本文所采用数值计算方法对垂直入水空泡形态的计算结果是可信的。在此基础上，本文进一步对圆锥垂直入水空泡形态、空泡壁面运动规律，以及空泡表面闭合规律等进行了计算分析。

#### 4 圆锥垂直入水早期空泡分析

圆锥匀速垂直入水速度为  $30\text{m/s}$ ，环境压强  $101325\text{Pa}$ ，空气和水的密度分别为  $1.225\text{kg/m}^3$  和  $998.2\text{kg/m}^3$ 。其入水过程不同时刻空泡如图 6 所示。

从图 6 中  $t=1.4\text{ms}$  到  $t=3.8\text{ms}$  时刻可以看出在入水过程中圆锥在其后划出一个开空泡，并随着圆锥的入水空泡在轴向方向上被拉长，在径向方向也

持续增大，入水处产生喷溅，自由液面高出未扰动液面；图 6 中  $t=7\text{ms}$  时刻和  $t=10.6\text{ms}$  时刻两幅图片显示出了空泡持续被拉长的过程，空泡宽度的变化较为复杂，入水过程中空泡最大直径变化过程将在图 7 中进行分析；在图 6 中  $t=19.8\text{ms}$  时刻空泡在自由液面闭合将空泡与空气域隔断，即表面闭合；在  $t=20.3\text{ms}$  时刻表面闭合处水流分别出现向下和向上的自由射流现象，该现象与文献[5]中垂直入水空泡表面闭合射流相似；并且随着入水深度的增加空泡外部环境压力增大，闭合后空泡内部气体质量一定，在一段时间内空泡继续增大，使得空泡内压减小最终出现空泡内外压差增大的趋势，因此在水面下出现空泡缩颈现象。下面对空泡壁面的运动规律进行了计算，并局限在表面闭合之前，不同时刻空泡壁面速度矢量如图 7 所示。

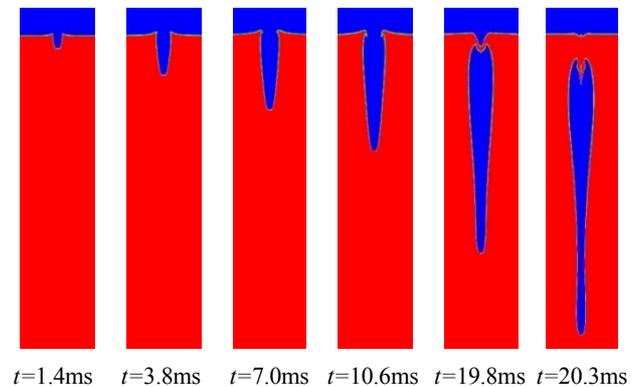


图 6 圆锥  $30\text{m/s}$  入水早期空泡变化

Fig.6 Time evolution of an air cavity in water entry of cone at  $30\text{m/s}$

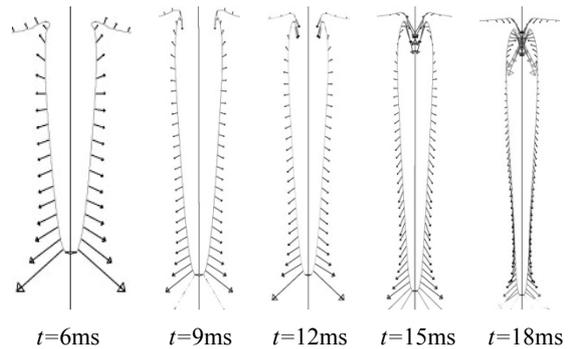


图 7 空泡壁面速度矢量图

Fig.7 The vector of speed of the cavity boundary

图 7 给出了圆锥入水不同时刻空泡壁面速度矢量图，图 7 中矢量线箭头代表速度方向，矢量线长度表示速度大小。由图 7 中不同时刻空泡壁面速度矢量可以看出，在表面闭合之前，从圆锥开始到自由液面空泡壁面速率逐渐减小，由速度矢量线的长度可以看出其速率呈非线性规律减小；其速度方向

沿空泡壁面从下到上呈逆时针方向旋转,从接近圆锥的斜向下逐步过渡到在接近自由液面处的斜向上方向,在接近空泡直径最大值处空泡壁面速度方向变为水平方向。空泡最大直径变化曲线如图 8 所示。

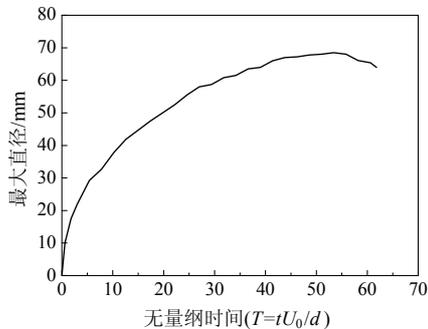


图 8 空泡最大直径随无量纲时间变化曲线

Fig.8 Maximum diameter of cavity vs dimensionless time

图 8 给出了空泡圆锥在 30m/s 速度入水过程中空泡最大直径随入水时间变规律。其中对入水时间进行了无量纲化:

$$T = tU_0 / d \quad (10)$$

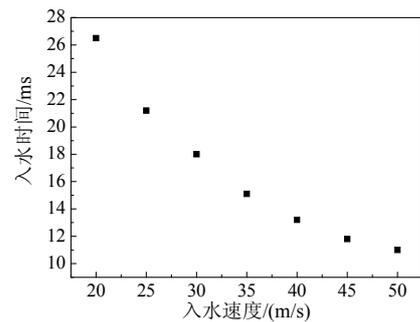
式中:  $d$  为特征长度,取锥形物体底部最大直径;  $U_0$  为物体入水时的速度;  $t$  为物体在水中运动的时间,以物体触水面时刻为初始时刻。

由图 8 可以看出,在发生表面闭合之前空泡最大直径呈非线性规律变化,出现先增大后减小的变化过程。由变化曲线切线斜率可以看出,其增长速度变化规律在初始时刻速度为最大值,随着入水的推移空泡壁面扩张速度减小,当扩张速度减小到零时空泡最大直径达到最大值,其后空泡最大直径出现减小过程,该变化规律与文献[4,14]中垂直入水空泡最大直径随时间变化规律吻合。

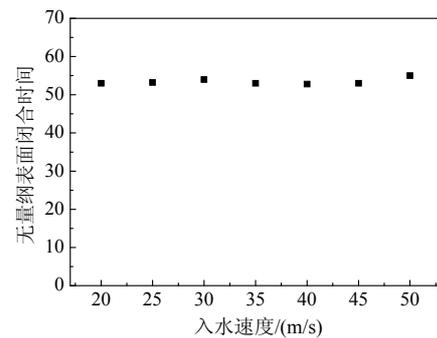
以上针对空泡形态变化以及空泡壁面运动规律进行了计算和分析,所研究状态均被约束在空泡发生表面闭合之前,下面针对垂直入水空泡表面闭合时间与入水速度变化规律进行分析说明。图 9(a)、图 9(b)分别给出了圆锥在不同速度条件下垂直入水空泡表面闭合时间和无量纲表面闭合时间变化规律。

由图 9(a)可以看出随着入水速度的增加,空泡表面闭合时间减小,拟合曲线切线斜率逐渐减小,最后趋近于零,由曲线斜率变化规律可得闭合时间减小趋势逐渐变缓慢。图 9(b)为与图 9(a)中对应速度闭合时间无量纲化结果。由图 9(b)可以看出,在以上速度范围内以不同速度入水,空泡表面闭合无

量纲时间趋于常值。



(a) 表面闭合时间与入水速度关系曲线



(b) 表面闭合无量纲时间与入水速度关系曲线

图 9 不同入水速度空泡表面闭合时间变化关系曲线

Fig.9 The time of surface closure vs different water entry velocity

## 5 结论

对球体空泡形态进行数值计算,与文献中理想空泡模型进行比较,并取得较好的一致性。在此基础上对圆锥匀速垂直入水早期空泡形态,空泡壁面运动规律,以及表面闭合进行了数值计算,得出以下结论:

(1) 对球体垂直匀速入水早期空泡形态数值计算,与文献中的理想空泡模型进行比较并取得了较好的一致性,证明了本文所采用方法的有效性。

(2) 对圆锥垂直入水空泡形态进行数值计算,得到了  $150^\circ$  锥角回转体匀速垂直入水空泡形态变化过程。

(3) 对圆锥垂直入水空泡壁面运动规律进行了计算分析,得到了  $150^\circ$  锥角回转体在一定速度范围内匀速垂直入水空泡壁面运动规律,以及其空泡最大直径变化规律。

(4)  $150^\circ$  锥角回转体垂直入水速度在 20m/s~50m/s 范围内,空泡表面闭合时间随着入水速度的增加而减小,无量纲表面闭合时间为常值。

## 参考文献:

- [1] Worthington A M. A study of splashes [M]. New York: Longmans Green and Company, 1908.
- [2] Worthington A M, Cole R S. Impact with a liquid surface [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1897, 189A: 137—148.
- [3] Von Karman Th. The impact on seaplane floats during landing [R]. Washington: NACA Transl, TN321, 1929.
- [4] Whalley I A. Project upkeep a review of the WW II dambuster weapon [C]. 38th AIAA Joint propulsion Conf, 2002, AIAA-2002-3796.
- [5] May A. Water entry and the cavity-running behavior of missiles [R]. Maryland: AD A020429, 1975.
- [6] Ashley S. Warp drive underwater [J]. Scientific American, 2001, 284: 70—79.
- [7] Mallock A. Sounds produced by drops falling on water [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1918, A95: 138—143.
- [8] Bell G E. On the impact of a solid sphere with a fluid surface [J]. Philosophical Magazine and Journal of Science, 1924, 48: 753—765.
- [9] May A, Woodhull Jean C. Drag coefficients of steel spheres entering water vertically [J]. Journal of Applied Physics, 1948, 19: 1109—1121.
- [10] David Gilbarg, Anderson Robert A. Influence of atmospheric pressure on the phenomena accompanying the entry of spheres into water [J]. Journal of Applied Physics, 1948, 19: 127—139.
- [11] May A. Effect of surface condition of a sphere on its water-entry cavity [J]. Journal of Applied Physics, 1951, 22: 1219—1222.
- [12] Shi Hong-Hui, Motoyuki Itoh, Takuya Takami. Optical observation of the supercavitation induced by high-speed water entry [J]. Journal of Fluids Engineering, 2000, 122: 806—810.
- [13] Truscott Tadd T, Techet Alexandra H. Water entry of spinning spheres [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 625: 135—165.
- [14] 陈学农, 何友声. 平头物体三维带空泡入水的数值模拟[J]. 力学学报, 1990, 22(2): 129—138.  
Chen Xuenong, He Yousheng. Numerical simulation of 3-D water entry of a blunt cylinder with a ventilated cavity [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1990, 22(2): 129—138. (in Chinese)
- [15] Yan Hongmei, Liu Yuming, Jakub Kominiarczuk, Yue Dick K P. Cavity dynamics in water entry at low Froude numbers [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 641: 441—461.
- [16] Jeffrey M Aristoff, John W M Bush. Water entry of small hydrophobic spheres [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 619: 45—78.
- [17] May A. The cavity after vertical water entry [R]. Maryland: NOLTR 68-114, 1968.

(上接第 230 页)

- [7] 白桦, 胡兆同, 胡庆安. 塔桅结构三维定常风场风洞试验及数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(1): 60—64.  
Bai Hua, Hu Zhaotong, Hu Qing'an. Wind tunnel test on 3D steady wind flow field of tower mast structure and numerical simulation [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(1): 60—64. (in Chinese)
- [8] 杨伟, 金海, 金新阳等. 温州机场新航站楼工程风荷载数值模拟研究[J]. 建筑结构, 2007, 37(8): 100—103.  
Yang Wei, Jin Hai, Jin Xinyang, et al. Numerical simulation for wind loads of new Wenzhou airport terminal [J]. Building Structure, 2007, 37(8): 100—103. (in Chinese)
- [9] 顾磊, 齐宏拓, 刘红军, 傅学怡. 奥运网球中心赛场风荷载和风环境数值模拟分析[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(3): 134—143.  
Gu Lei, Qi Hongtuo, Liu Hongjun, Fu Xueyi. Numerical simulation on wind load characteristics and wind environment for Olympic Park Tennis Centre Stadium [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(3): 134—143. (in Chinese)
- [10] 殷惠君, 张其林, 周志勇. 标准低矮建筑 TTU 三维定常场数值模拟研究[J]. 工程力学, 2007, 24(2): 139—145.  
Yin Huijun, Zhang Qilin, Zhou Zhiyong. Numerical simulation study of 3D steady atmospheric flow around standard low-rise building TTU model [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(2): 139—145. (in Chinese)
- [11] 周绪红, 聂少锋, 周天华, 龚焮. 低层双坡屋面建筑三维定常风场的数值模拟[J]. 工程力学, 2010, 27(3): 19—29.  
Zhou Xuhong, Nie Shaofeng, Zhou Tianhua, Gong Xin. Numerical simulation of 3D steady atmospheric flow around low-rise gable roof building [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(3): 19—29. (in Chinese)
- [12] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
Wang Fujun. Computational fluid dynamics analysis, CFD software principle and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [13] AIJ 1996, AIJ (Architectural Institute of Japan) recommendations for loads on buildings [S]. 1996.