

凹头弹丸垂直入水仿真研究

黄振贵¹, 罗驭川^{1,2}, 陈志华¹, 侯宇¹, 唐楚淳¹

(1. 南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094; 2. 航天动力测控技术研究所, 陕西 西安 710025)

摘要: 凹头弹丸是一种含有部分中空腔体的结构, 在以头部开空腔部分首先冲击自由液面的过程中, 空腔内气相-液相两相耦合, 与弹丸形成复杂的固相、液相、气相三相运动。为分析凹头弹丸在低速垂直入水条件下弹丸头部形状和内部空腔对入水空泡及弹道特性的影响, 采用数值模拟方法研究不同凹腔深度的凹头弹丸入水过程空泡流动变化, 并将其与平头弹垂直入水过程进行对比, 得到了入水瞬间各弹丸能量耗散程度的规律以及入水后加速度、阻力系数以及速度的变化趋势。结果表明: 不同弹丸入水空泡有着较明显的区别; 平头弹丸与凹头弹丸运动入水开孔泡阶段, 头部压力骤增, 形成阶段头部压力减小, 表面闭合阶段头部压力又开始骤增。

关键词: 凹头弹丸; 垂直入水; 空腔; 弹道特性; 耦合

中图分类号: TJ012.3⁺⁴ **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2020)S1-0128-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.S1.019

Simulation on Vertical Water – entry of Concave – nosed Projectile

HUANG Zhengui¹, LUO Yuchuan^{1,2}, CHEN Zhihua¹, HOU Yu¹, TANG Chuchun¹

(1. National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China; 2. Aerospace Power Measurement and Control Technology Research Institute, Xi'an 710025, Shaanxi, China)

Abstract: Concave-nosed projectile is a kind of structure with a part of hollow cavity. In the process of first impacting the free liquid surface by the concave part of projectile nose, the gas-liquid two-phase coupling in the cavity forms complex solid-liquid-gas three-phase motion with the projectile. In order to study the influences of nose shape and internal cavity of concave-nosed projectile on the characteristics of water-entry cavitation and trajectory under the condition of low-speed vertical water-entry, the numerical simulation method is used to study the change of cavitation flow during the water-entry process of concave-nosed projectile. The results show that the water-entry cavities of flat-nosed, concave-nosed and hollow projectiles are obvious different. The regularity of energy dissipation degree of each projectile at the moment of water entry and the changing trend of acceleration, drag coefficient and velocity after water entry were obtained. During the opening stage of flat- and concave-nosed projectiles, the nose pressure increases sharply, while the nose pressure decreases in the formation stage and then increases sharply in the closing stage of surface.

Keywords: concave-nosed projectile; vertical water entry; cavity; ballistic characteristic; coupling

收稿日期: 2019-11-20

基金项目: 装备预先研究重点实验室基金项目(614260403041803); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(309190112A2、30917012101)

作者简介: 黄振贵(1986—), 男, 博士, 副研究员。E-mail: hzgkeylab@njust.edu.cn

0 引言

弹丸入水作为一种复杂的瞬态物理现象,是近年来研究的一个热点课题。弹丸以一定速度入水的过程会产生空泡,低速状态下产生的空泡称为吸气空泡,其形成是由于入水后压力差引起气体和液体分子流动产生的一种复杂耦合运动。空泡产生发展以及闭合溃灭,对弹丸运动特性会造成较大的影响,为研究这一现象并设计和制作成熟的水中作战兵器,学者们开展了大量相关研究工作。

入水问题的研究最早由 von Karman^[1] 提出基础理论并开展了相关研究。1932 年 Wagner^[2] 对 Karman 的方法进行了修改,使结果更符合实际情况。近年来,许多国内外学者在理论方法和数值分析方面已经做了大量研究工作,对于结构入水过程中的低速入水问题取得了较大进展。Yan 等^[3] 利用高速相机记录了低 Froude 数下球体自由落体入水过程中空泡形态的演变过程。Wei 等^[4] 利用高速相机记录了球体入水过程中空泡形态的演变过程,计算了球体入水速度变化情况。孙钊等^[5] 采用多相流模型结合动网格技术对球体入水进行数值研究,分析了表面润湿性对入水空泡的影响。路中磊等^[6-8] 以开口端撞击入水过程对开放腔体结构进行了数值模拟与实验研究,对空泡和空泡壁面波动的形成机理进行了分析。何春涛等^[9-10] 基于流体体积函数 (VOF) 方法和有限体积法求解气、水两相流动的雷诺时均 N-S (RANS) 方程,结合动网格技术对弹丸垂直入水空泡流动进行了数值计算研究,并在 VOF 多相流模型中嵌入水蒸气和水之间的质量输运模型,成功实现了垂直入水空泡流的数值计算。王瑞琦等^[11] 通过动网格数值计算方法对尖头弹丸进行数值模拟,利用自定义函数 (UDF) 输出了表面闭合情况下弹丸的位移、速度和加速度。综上所述可知,现阶段针对球体和头部凸起的弹型研究较广泛,对凹头弹丸研究较少。

入水空泡的存在对水雷、空投鱼雷、导弹和超空泡射弹等武器入水瞬间的流体动力特性、结构本身和水下初始弹道的稳定性等具有重大的影响,而影响入水空泡最主要的因素之一就是弹丸头型,这也是本文重点研究的内容。本文对比凹形弹丸与平头弹丸以及空心弹的运动过程,对入水过程中运动参数进行了比较和分析,得出不同弹丸的运动规律和空泡演变规律,以期对相关方向研究提供一定的参考。

1 控制方程

低速情况下水介质不可压缩,因此可采用 VOF 多相流模型描述空气、水形成的两相流动,连续性方程和动量方程为

$$\nabla U = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) =$$

$$- \nabla p + \rho g + F + \nabla \cdot [\mu (\nabla U + \nabla U^T)], \quad (2)$$

式中: U 为混合相速度; ρ 为混合相密度, $\rho = \sum \alpha_q \rho_q$, α_q 为第 q ($q = g, l, v$) 相流体的体积分数, $\alpha_q = 1$ 表示网格单元内全为水, $\alpha_q = 0$ 表示网格单元内全为空气, $0 < \alpha_q < 1$ 表示网格单元内为气体-液体交界面, $\sum \alpha_q = 1$, ρ_q 为第 q 相的密度; p 为压力; g 为重力加速度; F 为因表面张力和壁面黏附作用引起的动量方程源项; $\mu = \sum \alpha_q \mu_q$ 为混合相的动力黏度, μ_q 为第 q 相的动力黏度。

采用 Brackbill 等提出的连续表面力模型 (CSF), 表面张力为

$$F = \sigma \frac{2\rho\kappa \nabla\alpha_l}{\rho_l + \rho_g}, \quad (3)$$

式中: σ 为表面张力系数, 本文取 0.0725 N/m ; κ 为表面曲率, $\kappa = \nabla \cdot \hat{n}$, \hat{n} 为单位法向量, $\hat{n} = \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|}$, \mathbf{n} 为液相体积分数的梯度, $\mathbf{n} = \nabla\alpha_l$, α_l 为网格单元内液相体积分数; ρ_l 为网格单元内液相密度; ρ_g 为网格单元内气相密度。

2 数值方法与计算模型

本文主要针对凹头弹丸入水过程进行数值模拟,采用平头弹和空心弹与其进行对比。对于低速垂直入水情况,忽略横向扰动,仅考虑垂直入水过程。弹丸模型如图 1 所示。本文中各弹丸按形状特点分别称为平头弹丸、凹尖头弹丸、凹头弹丸 A、凹头弹丸 B、凹头弹丸 C、空心弹丸,材料选取密度为 7.85 g/mm^3 的 45 号钢,各弹丸参数已在图 1 中标注。

流体力学数值模拟中模拟方法的选择至关重要。目前,流体力学模拟方法主要有湍流模拟方法和层流模拟方法两种。其中湍流模拟方法包括大涡模拟 (LES) 与 RANS,以及直接数值模拟 (DNS) 方法。本文基于出流 (outflow) 边界条件,采用层流计算方法和滑移网格技术,对各弹丸低速入水吸气空

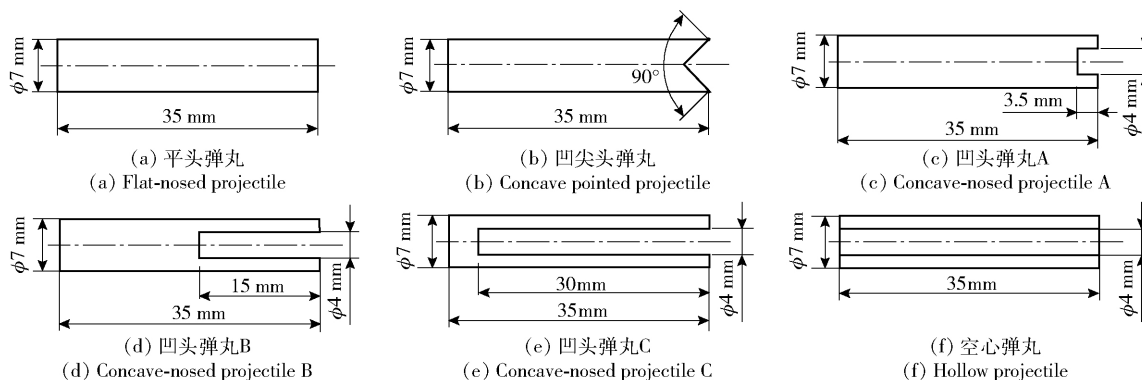


图 1 弹丸模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of projectile models

泡问题进行数值研究,对计算结果进行分析。计算域如图 2 所示,其大小为 $500\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 。为减少计算时间以及降低计算难度,将计算模型简化为轴对称二维模型。弹丸头部距水面高度为 14 mm ,设置初速为 3 m/s 。

3 仿真结果及数据分析

图 3 所示为各弹丸入水相图,入水速度相同,均为 3.04 m/s ,各子图均为 $10 \sim 50\text{ ms}$ 相图,每张间隔 10 ms 。从图 3 中可以看出,弹丸入水过程中包括碰撞水面、开空泡、空泡拉长、表面闭合(深闭合)等过程,其中空心弹丸为深闭合,其他弹丸均为表面闭合。由图 3 可见,凹尖头弹丸头部空腔受到挤压,大部分气体在入水后便被排出,而凹头弹丸 A、B、C 入水后,头部空腔气体由于形状原因来不及逸出,只有较少部分因头部压力过大而逸出,而且凹头弹丸 A、B、C 空泡大小几乎相同。空心弹丸入水后,两侧由于向外的压力排开产生空泡,而且能够观察到空心弹产生的空泡明显小于其他弹丸,内部空腔则快速产生向上的水柱,逐渐将气体压出,最后与外部空泡融合。

图 4、图 5、图 6 所示分别为 6 种弹丸加速度变化规律图、阻力系数变化规律图、速度变化规律图。由图 4、图 5、图 6 可知,弹丸垂直入水时,弹丸所受阻力相对较小,重力一直起主导作用,各弹丸入水之后仍一直保持加速运动。头部撞击液面瞬间能量传递给液面,使流体质点产生各向分速度。此时弹丸会产生较大的阻力,加速度随之骤减,流体质点此时与液面也随之产生空泡,空泡产生之后弹丸所受阻力也随之减小。由图 5 可知,入水瞬间加速度衰减程度峰值由高到低分别为凹头弹丸 C、凹头弹丸 B、平头弹丸、凹头弹丸 A、凹尖头弹丸和空心弹丸,入水瞬间各弹丸能量耗散程度的规律与之一致。

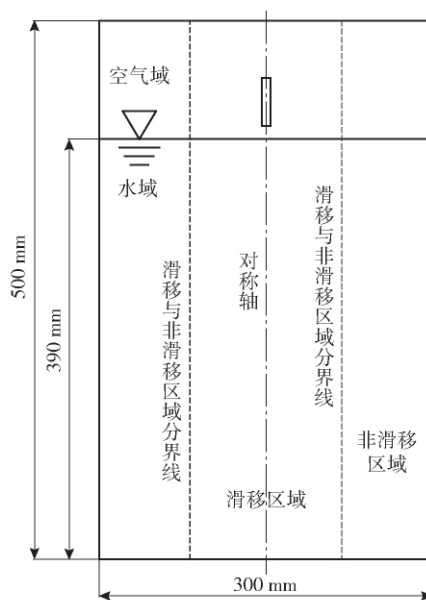
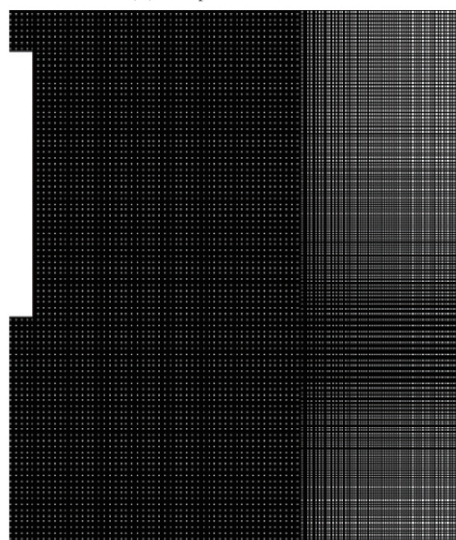
(a) 计算域
(a) Computational domain(b) 局部网格划分
(b) Local meshing

图 2 计算域及网格划分

Fig. 2 Computing domain and meshing

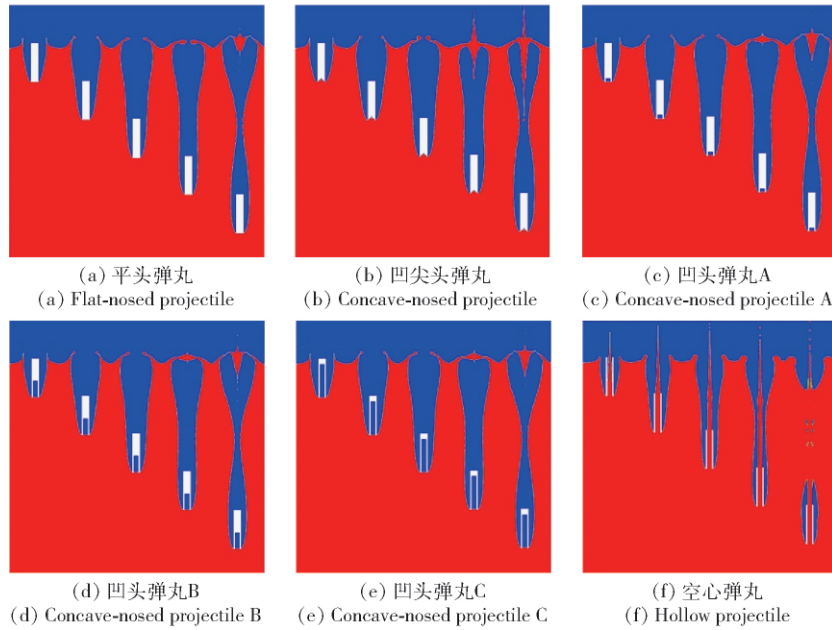


图 3 各模型相图

Fig. 3 Phase diagram of each model

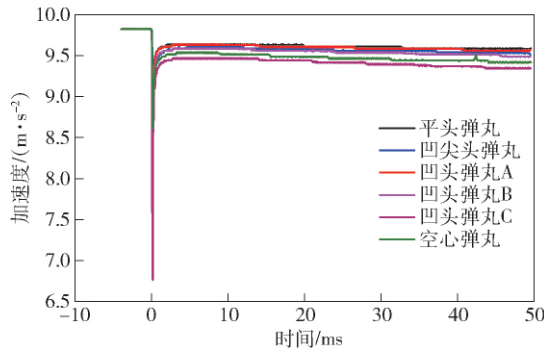


图 4 弹丸加速度变化规律

Fig. 4 Variation of projectile acceleration

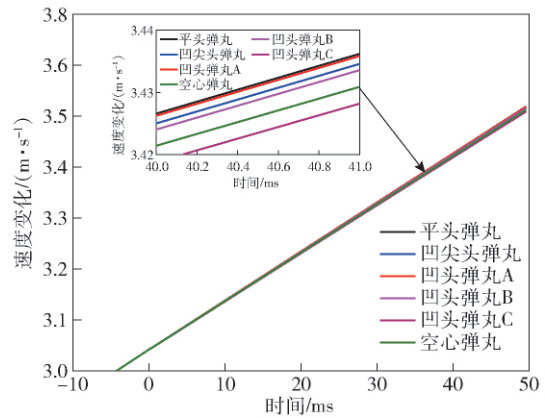


图 6 速度变化规律

Fig. 6 Change law of speed

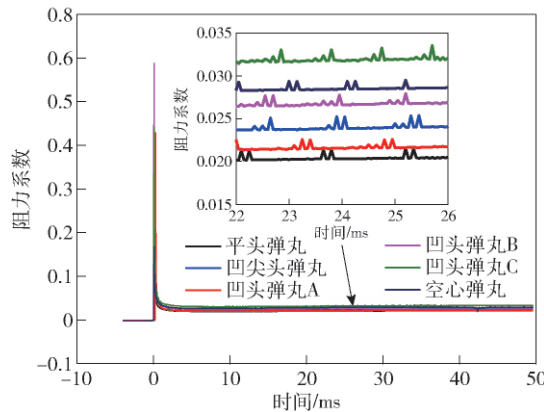


图 5 弹丸阻力系数变化规律

Fig. 5 Variation of projectile resistance coefficient

分析可得凹头弹丸 C 和凹头弹丸 B 是由于相对平头弹丸、凹头弹丸 A 和凹尖头弹丸质量较小，

碰撞水面时速度损失较大，加速度骤减更多，即入水瞬间凹头弹丸 C 阻力对其影响程度最大；而平头弹丸、凹头弹丸 A 和凹尖头弹丸质量接近，此时入水的接触水面面积按大小排布分别为平头弹丸、凹头弹丸 A、凹尖头弹丸，接触面积越大，加速度骤减越多；空心弹丸是由于内外都与空气接触，流体质点可以向弹丸两边排开，而弹丸内部空腔没有像凹头弹丸和凹尖头弹丸一样受压力差影响，入水瞬间阻力对其影响程度最小，加速度骤减程度较小。

6 种弹丸入水后速度和加速度变化趋势一致，由高到低依次为平头弹丸、凹头弹丸 A、凹尖头弹丸、凹头弹丸 B、空心弹丸、凹头弹丸 C，阻力系数变化规律与之相反。首先对比平头弹丸、凹头弹丸 B

和凹头弹丸 C, 入水后弹丸空腔越长, 加速度越小, 这是由弹丸受力决定的。入水后弹丸受到重力、浮力和入水阻力, 由于凹头弹内部空腔气体几乎都未排出, 凹头弹 B、凹头弹 C 和平头弹丸浮力近似相同; 而入水阻力做功以能量传递的形式呈现, 由于入水后弹丸能量传递给流场形成空泡, 而平头弹丸和凹头弹丸空泡大小近似相同, 可知平头弹丸和凹头弹丸入水阻力近似相同; 且由于凹头弹丸 B、C 和平头弹丸的重力差别较明显, 此时合力主要以重力差别为主导而形成加速度差, 从而速度呈现较明显的差别。对比平头弹丸、凹头弹丸 A、凹尖头弹丸, 三者质量近似, 此时头型对阻力影响较大, 是产生速度和加速度差别的主要原因, 可知平头弹丸入水后阻力相对凹头弹丸 A 与凹尖头弹丸较小, 一直保持

最高的增速运动。

4 弹丸云图简析

下面对典型凹尖头弹丸和凹头 A 弹丸云图进行分析。图 7、图 8 所示为凹尖头弹丸和凹头 A 弹丸流场密度和压力变化云图。由于密度与压力变化云图关于弹丸轴线对称, 故取各图一半进行对比观察以使结果更为清晰明了。图 7 和图 8 中, 各时刻左半图为水-气体两相组成, 表明空泡发展情况; 各时刻右半图部分为压力分布图, 表明空泡流域中压力场的变化过程。由图 7 和图 8 可以看出, 入水瞬间弹丸头部压力骤增, 空泡形成阶段弹丸头部压力变小, 空泡发生闭合时弹丸头部压力又急剧增大。开空泡阶段空泡内部压力小于外界大气压, 由于压

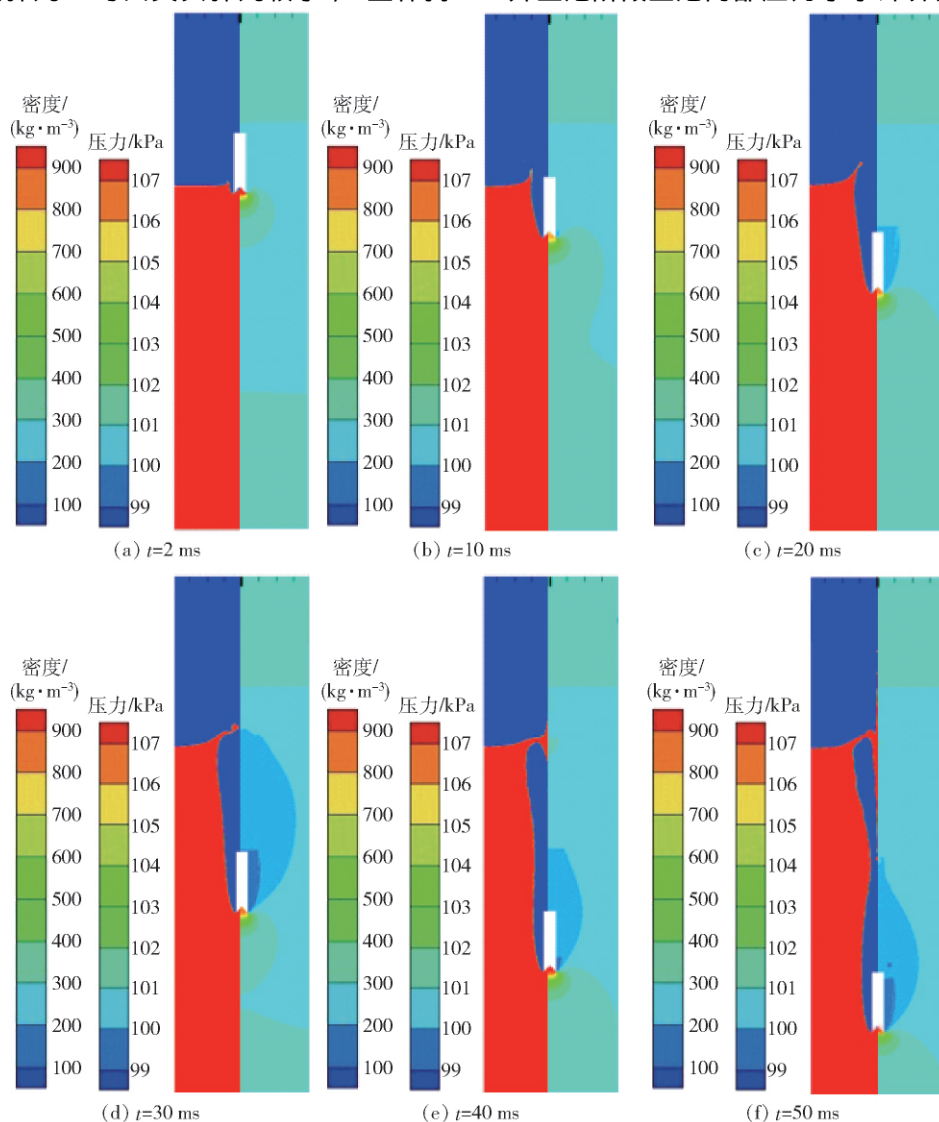


图 7 凹尖头弹丸流场密度(左)与压力变化云图(右)

Fig. 7 Cloud diagrams of flow field density (left) and pressure change (right) around concave-nosed projectile

差将空气吸入空泡中,面闭合时空泡内部可以先看出弹丸周边压力下降较为明显,而且闭合点压力会有明显升高。此时空腔内部封闭,而且内部由于弹丸向下运动而导致气压降低(30 ms),两侧液体质点

向中间涌动,气压又开始升高(40 ms),随弹丸运动空泡与液面空泡逐渐开始脱离,导致弹丸周围空泡气压降低(50 ms),在表面闭合过程中弹丸受到空腔挤压而产生向下的加速度,由此导致头部压力骤增。

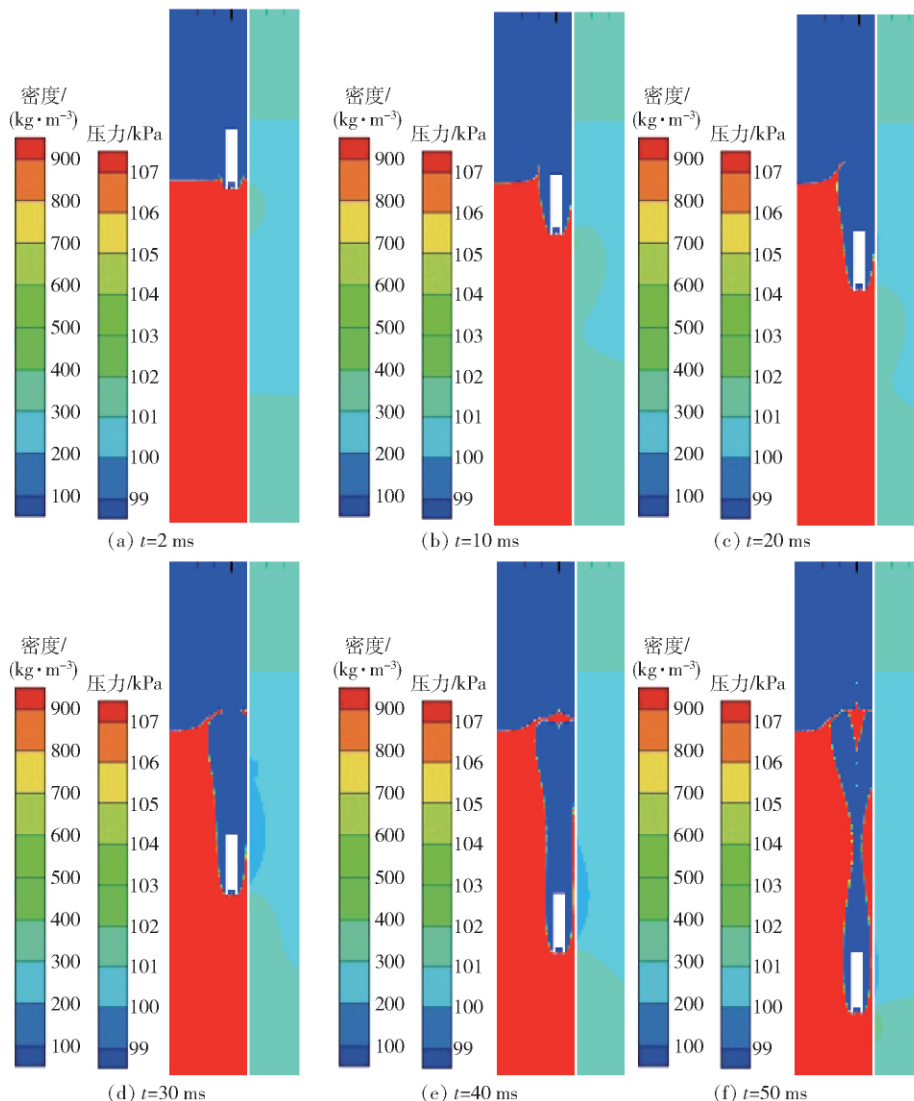


图 8 凹头弹丸流场密度(左)与压力变化云图(右)

Fig. 8 Cloud diagrams of the flow field density (left) and pressure change (right) around concave-nosed projectile

5 结论

本文通过计算流体力学软件 Fluent 对平头弹丸、凹头弹丸和空心弹丸垂直低速入水过程进行仿真,分析了不同头型弹丸对入水空泡和弹道特性的影响规律。得到以下主要结论:

1) 采用低速入水常规模拟方法主要针对平头弹丸、凹头弹丸和空心弹丸垂直入水过程进行研究,不同弹丸入水空泡有较明显区别,平头弹丸与凹头弹丸在 3.04 m/s 条件下为表面闭合,空心弹丸为深闭合。

2) 入水瞬间各弹丸能量耗散程度的规律由高到低分别为凹头弹丸 C、凹头弹丸 B、平头弹丸、凹头弹丸 A、凹尖头弹丸、空心弹丸。入水后速度和加速度变化趋势一致,由高到低依次为平头弹丸、凹头弹丸 A、凹尖头弹丸、凹头弹丸 B、空心弹丸、凹头弹丸 C,阻力系数变化规律与之相反。

3) 由于入水过程中弹丸会携带气体进入,弹丸空腔与外界大气压会形成明显的压差,从而弹丸运动入水开孔泡阶段头部压力骤增,形成阶段头部压力减小,表面闭合阶段头部压力又开始骤增。

参考文献(References)

- [1] VON KARMAN T. The impact of seaplane floats during landing: TN2321 [R]. Washington ,DC ,US: National Advisory Committee for Aero-Nautics ,1929.
- [2] WAGNER H. Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces [J]. Zeitschrift fur Angewandte Mathematic und Mechanik ,1932 ,12(4) :193 -215.
- [3] YAN H M ,LIU Y M ,JAKUB K ,et al. Cavity dynamics in water entry at low Froude numbers [J]. Journal of Fluid Mechanics , 2009 ,641:441 -461.
- [4] WEI Z H ,WANG S S ,MA F ,et al. Experimental investigation of water-entry phenomenon [J]. Journal of Beijing Institute of Technology 2010 ,19(2) : 127 -131.
- [5] 孙钊 ,曹伟 ,王聪 ,等. 表面润湿性对球体入水空泡形态的影响研究 [J]. 兵工学报 2016 ,37(4) :670 -676.
SUN Z ,CAO W ,WANG C ,et al. Effect of surface wettability on the morphology of spheres in water [J]. Acta Armamentarii 2016 , 37(4) :670 -676. (in Chinese)
- [6] 路中磊 ,魏英杰 ,王聪 ,等. 正浮力开放腔体圆柱壳垂直入水数值研究 [J]. 振动与冲击 2016 ,35(16) :79 -85.
LU Z L ,WEI Y J ,WANG C ,et al. Numerical study of vertical buoyancy of a cylindrical shell with open cavity in vertical water in-flow [J]. Journal of Vibration and Shock 2016 ,35(16) :79 -85. (in Chinese)
- [7] 路中磊 ,魏英杰 ,王聪 ,等. 基于高速摄像实验的开放腔体圆柱壳入水空泡流动研究 [J]. 物理学报 2016 ,65 (1) :309 -323.
LU Z L ,WEI Y J ,WANG C ,et al. An experimental study of water-entry cavitating flows of an end-closed cylindrical shell based on the high-speed imaging technology [J]. Acta Physica Sinica , 2016 ,65 (1) :309 -323. (in Chinese)
- [8] 路中磊 ,魏英杰 ,王聪 ,等. 开放空腔壳体入水扰动流场结构及空泡失稳特征 [J]. 物理学报 2017 ,66(6) :064702.
LU Z L ,WEI Y J ,WANG C ,et al. Experimental and numerical investigation on the flow structure and instability of water-entry cavity by a semi-closed cylinder [J]. Acta Physica Sinica 2017 ,66(6) : 064702. (in Chinese)
- [9] 何春涛 ,王聪 ,闵景新 ,等. 回转体匀速垂直入水早期空泡数值模拟研究 [J]. 工程力学 2012 ,29(4) :237 -243.
HE C T ,WANG C ,MIN J X ,et al. Numerical simulation of cavitation in the early stage of a rotating body entering water at a uniform vertical speed [J]. Engineering Mechanics 2012 ,29(4) :237 -243. (in Chinese)
- [10] 何春涛 ,王聪 ,魏英杰 ,等. 垂直入水空泡内部压强分布数值研究(英文) [J]. 船舶力学 2011 ,15(9) :960 -968.
HE C T ,WANG C ,WEI Y J ,et al. Numerical study on pressure distribution in a vertically-into-water cavity [J]. Ship Mechanics 2011 ,15(9) :960 -968. (in Chinese)
- [11] 王瑞琦 ,黄振贵 ,朱世权 ,等. 平头弹丸入水空泡闭合实验研究及数值模拟 [J]. 兵器装备工程学报 2017 ,38(12) :36 -39.
WANG R Q ,HUANG Z G ,ZHU S Q ,et al. Experimental study and numerical study of cavity closure of flat projectile entering water [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering ,2017 , 38(12) :36 -39. (in Chinese)