

doi: 10.7690/bgzd.2022.03.007

水下弹丸不同攻角流场特性研究

李侃伟¹, 韩晓明¹, 张浩², 张超³, 翟明辉¹

(1. 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2. 晋西工业集团有限责任公司防务装备研究院, 太原 030027;
3. 中国船舶重工集团公司第 713 研究所, 郑州 450045)

摘要: 针对水下弹丸在不同攻角下的流场特性, 基于 Rayleigh-Plesset 方程、VOF 多相流模型, 建立一种弹丸水下运动过程的数值模拟方法。对比分析相同初速条件下, 弹丸以不同攻角运动对运动过程中的空泡形态、流场演化及受力特性的影响。结果表明: 攻角越大, 弹丸的空化效果越差, 在运动过程中受到的升力和阻力也会越大, 将严重影响弹丸的水下弹道稳定性。

关键词: 水下; 攻角; 数值模拟; 空泡; 弹道稳定性

中图分类号: TJ012.3 **文献标志码:** A

Study on Flow Field Characteristics of Underwater Projectile at Different Angle of Attack

Li Kanwei¹, Han Xiaoming¹, Zhang Hao², Zhang Chao³, Zhai Minghui¹

(1. College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Defense Equipment Research Institute, Jinxi Industries Group Co., Ltd., Taiyuan 030027, China;
3. No. 713 Institute of China Shipbuilding Heavy Industry Group, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: Based on the Rayleigh-Plesset equation and the Vof multiphase flow model, a numerical simulation method of the underwater projectile motion process was established according to the flow field characteristics of the underwater projectile at different angles of attack. Under the same initial velocity, the effects of projectile motion at different angles of attack on the cavity shape, flow field evolution and force characteristics in the process of motion are compared and analyzed. The results show that the larger the angle of attack is, the worse the cavitation effect is, and the larger the lift and drag are, which will seriously affect the underwater trajectory stability of the projectile.

Keywords: underwater; angles of attack; numerical simulation; cavitation; ballistic stability

0 引言

弹丸在水下运动时所受的阻力远大于在空气中的阻力, 导致常规弹丸动力急剧衰减, 弹道发生偏转, 丧失有效杀伤能力; 因此, 分析水下弹丸的流场特性对未来水中作战兵器的研制有着重要意义。

针对弹丸水下运动特性, 国内外学者相继开展了研究。REICHARDT^[1]在某一空化数范围内针对圆盘空化器和圆锥空化器的参数进行了研究, 得出空化器的阻力变化规律; YAMASHITA 等^[2]对水下超高速的球形与细长体弹体进行了研究, 发现超空泡的存在大大降低了水下航行体的阻力; 李强等^[3]分析了带不同空化器的超空泡射弹在空化和全沾湿 2 种情况下减阻特性和空化数变化; 张学伟^[4]对超空泡射弹的减阻性能以及影响射弹运动稳定性的因素进行了分析; 蔡涛等^[5]分析了空化槽形状与尺寸对弹丸水下运动的弹丸稳定性和减阻特性的影响机

制; 刘立栋等^[6]建立并简化了水下高速射弹动力学和运动学模型, 对水下高速射弹弹道特性进行了仿真; 施红辉等^[7]建立了水下 2 连发和 3 连发射弹的数值计算模型, 获得了连发射弹的阻力特性曲线; 曹红松等^[8]对水下以不同速度运动弹丸的阻力和空泡形态进行了数值模拟, 得出弹丸在水下运动过程中空泡形态和阻力系数随速度的变化规律; 熊天红等^[9]建立了自然空化流动的多相流模型, 分析了射弹空化器直径、长细比和空化数等对射弹超空泡几何形态以及阻力特性的影响; 易文俊等^[10]计算了圆盘空化器射弹的空泡形态, 计算了高速射弹的自然超空泡减阻率; 袁绪龙等^[11]建立了自然空化流动的多相流 CFD 模型, 计算了半球头细长回转体的空化流动并与实验测量结果进行了比较; 张纪华等^[12]建立了射弹自然空化的 3 维仿真计算模型, 通过数值仿真得出二者随攻角的变化规律。

收稿日期: 2021-11-06; 修回日期: 2021-12-28

基金项目: 装备预研领域基金(6140240040106)

作者简介: 李侃伟(1996—), 男, 山西人, 硕士, 从事发射理论与技术研究。E-mail: 876231409@qq.com。

笔者以超空泡射弹为研究对象，基于 Rayleigh-Plesset 方程和 VOF 多相流模型，采用 CFD 软件建立射弹水下运动过程的数值模拟方法，研究弹丸在不同攻角下的流场特性。本研究成果对超空泡射弹的动态减阻特性分析具有一定的参考价值。

1 控制方程和数学模型

1.1 控制方程

笔者采用 VOF 多相流模型模拟气、液两相形成的各相运动。VOF 是一种在固定的欧拉方法下的表面跟踪方法，当需要得到一种或多种互不相融流体间的交界面时，可以采用这种模型。其连续性方程和动量方程如下：

1) 连续性方程：

$$\partial \rho_m / \partial t + (\partial / \partial x_i)(\rho_m u_i) = 0. \quad (1)$$

式中： ρ_m 为混合物密度， $\rho_m = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2$ ， α_1 、 α_2 分别为液相和气相体积分数， ρ_1 、 ρ_2 分别为液相和气相密度。

2) 动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_m \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_r}{\partial x_r} \right) - \rho_m \overline{u'_i u'_j} \right] + \rho_m f_i. \quad (2)$$

式中： u_i 、 u_j 为流体微团在 i 轴、 j 轴方向的速度 ($i, j=1, 2, 3$)； u_r 为流体微团在张量 r 方向的速度； $\rho_m u_j = \sum_{k=1,2,3} \alpha_k \rho_k u_{ik}$ ， u_{ik} 为第 k 相在 i 轴方向的速度； p 为流体压力； μ_m 为混合相动力黏性系数； δ_{ij} 为 Kronecker 符号； $\overline{u'_i u'_j}$ 为 i 轴、 j 轴方向速度脉动乘积的平均值； f_i 为 i 轴方向的质量力。

1.2 空化模型

空泡是在液体介质遭到连续性破坏的基础上出现的，是压力降低的结果；或者说，当液体内某点压力降低到某个临界压力以下时，液体发生汽化，先是微观的，然后成为宏观的小气泡，尔后在液体内部或液体与固体的交界面上，汇合形成较大的蒸汽与气体的空腔，称为空泡。空泡产生、发展与溃灭过程称为空化现象^[13]。

Fluent 在各种假设下模拟超空泡流动，不考虑蒸发潜热的影响，认为是在等温过程下完成的。考虑压力、气泡容积 ϕ 影响下的 Rayleigh-Plesset 方程为^[14]：

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + 3 \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{P_B - P}{\rho_l} - \frac{2\sigma}{\rho_l R} - 4 \frac{\mu_l}{\rho_l R} \frac{dR}{dt}. \quad (3)$$

式中： R 为气泡半径； P_B 为空泡内压力； ρ_l 为流体密度； σ 为气泡交界面上的表面张力。

1.3 湍流模型

笔者计算选取在多相耦合等复杂流场中具有较高模拟精度和数值稳定性的 Realizable $k-\epsilon$ 模型，近壁面处理方法采用标准壁面函数。其中湍动能 k 和湍流耗散率 ϵ 的方程表示如下：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_m k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m \mu_t k)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ &G_k + G_b - \rho_m \epsilon - Y_M + S_k, \\ \frac{\partial(\rho_m \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m \mu_t \epsilon)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ &C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho_m \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon. \end{aligned} \quad (4)$$

式中： μ_t 为湍流动力黏性系数， $\mu_t = C_\mu k^2 / \epsilon$ ； $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 为经验系数； σ_k 和 σ_ϵ 为湍流普朗特数； G_k 、 G_b 为速度梯度和浮力引起的湍动能； Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对耗散率的影响； S_k 和 S_ϵ 为自定义源项^[15]。

2 计算模型及网格

笔者采用的射弹模型如图 1 所示。模型为锥形细长体，头部为平头空化器，总长为 268 mm，圆柱段直径为 18 mm。

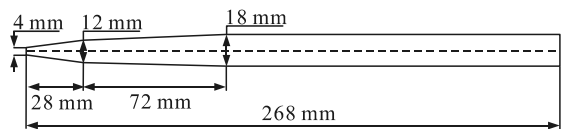


图 1 射弹模型

计算域及边界条件设置如图 2 所示。由于弹丸流场呈对称分布，且笔者只关注弹丸纵截面上的流场分布以及受力情况，故计算模型采用 2 维模型。2 维模型的优点是不但可以满足精度要求，而且计算效率更高。计算域长度为 25 倍弹长，前端边界距离弹丸头部 4 倍弹长，后端边界距离弹丸尾部为 20 倍弹长，宽度为 8 倍弹长。笔者采用射弹固定，流域运动的方式实现不同攻角下弹丸空化流场仿真，以此得出弹丸的流场特性及作用在弹丸上的流体动力随攻角的变化曲线。故将计算域左侧设置为速度入口，其余 3 侧均为压力出口，弹体表面为壁面边界条件。

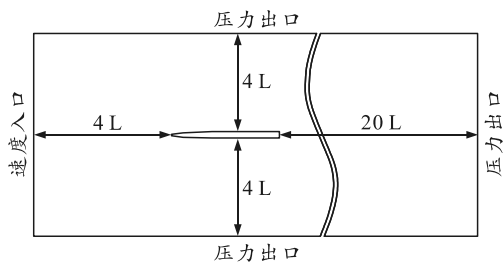


图 2 计算域及边界条件

整个计算域采用非结构网格，对弹丸及弹丸运动区域进行局部加密，网格数量约 50 万。弹丸周围网格划分情况如图 3 所示。

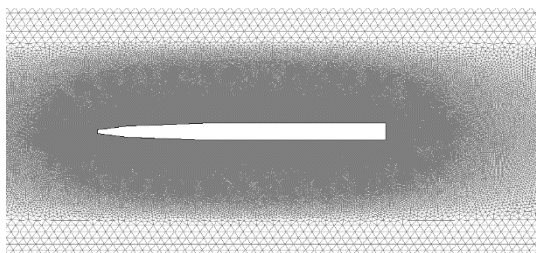
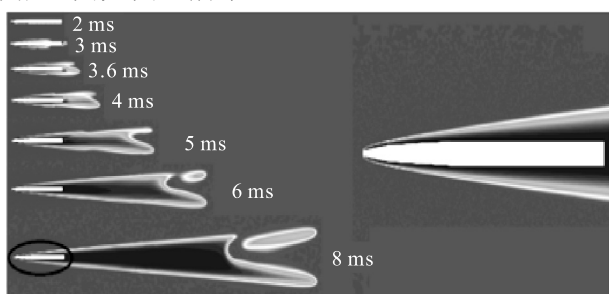


图 3 网格划分

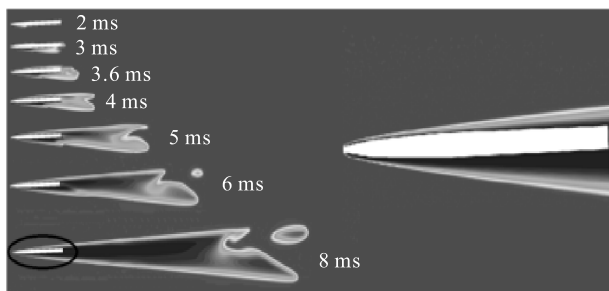
本计算模型压力与速度耦合求解采用 SIMPLEC 算法，压力场和空间离散采用 PRESTO! 格式，各项体积率离散采用 CICSAM 格式，Gradient 梯度离散方法采用 Green-Gauss Node Based 方法，密度和动量采用二阶迎风离散格式，空间离散采用二阶迎风格式，时间离散采用一阶隐格式。

3 计算结果与分析

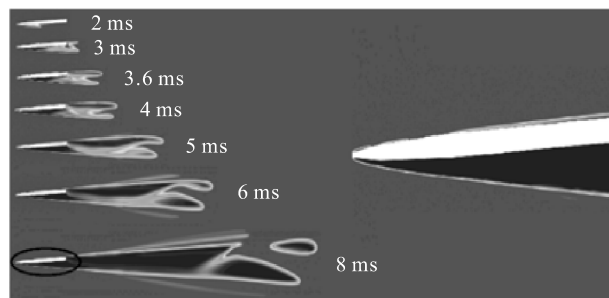
在初速为 500 m/s 时，不同攻角下的弹丸流场各相云图如图 4 所示。



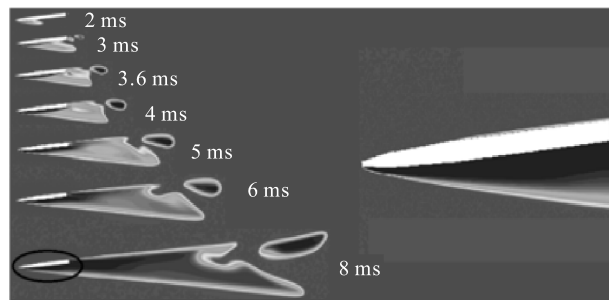
(a) 0°攻角



(b) 2°攻角



(c) 4°攻角

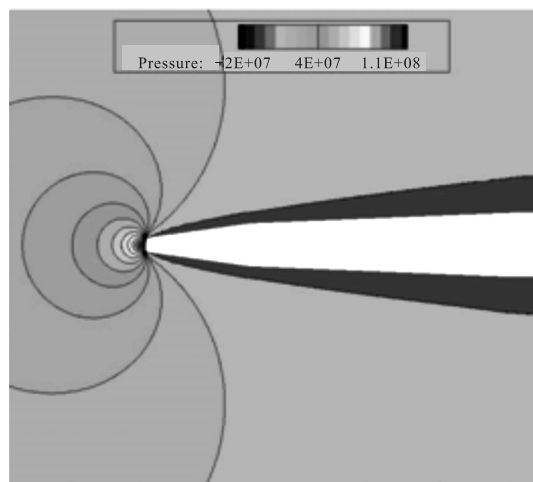


(d) 6°攻角

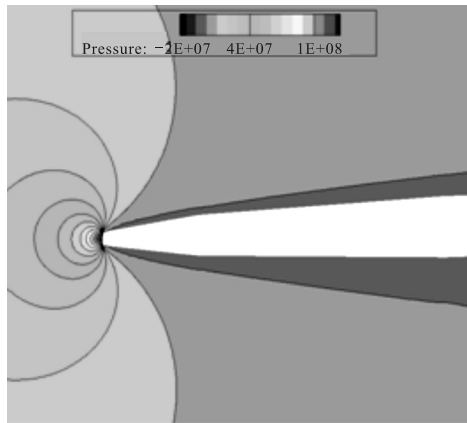
图 4 不同攻角流场各相分布云图

由上图可以看出：随着流场的运动，从弹丸头部开始形成空泡，空泡逐渐增大并形成包裹整个弹体的超空泡，之后空泡继续延伸扩展。由于重力的影响，形成的空泡并不完全对称。通过对比不同攻角弹丸的空泡形态可以看出，当攻角为 0°和 2°时，弹丸与空泡之间有一定间隙，弹体完全被空泡包裹，弹丸在这种状态下产生的空泡就是超空泡，而在超空泡的作用下，可以大幅减小弹丸运动过程中的阻力；而攻角为 4°和 6°时，弹体与空泡均有部分接触，产生不同程度的沾湿现象，此时是局部空化状态，形成的超空泡并不能将弹丸完全包裹，故此时弹丸受到的阻力较大。

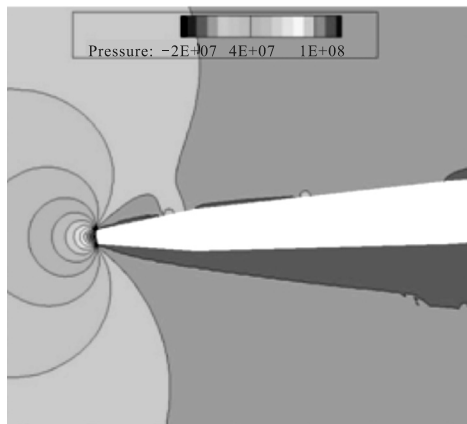
不同攻角弹丸压力等值线图如图 5 所示。



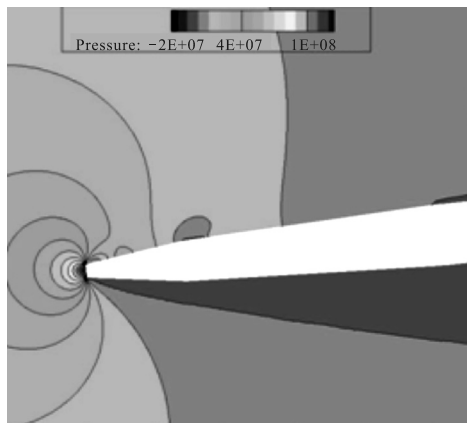
(a) 0°攻角



(b) 2°攻角



(c) 4°攻角



(d) 6°攻角

图 5 不同攻角弹丸压力等值线

由上图可以看出：随着流场的运动，弹丸头部空化器能形成高压区，弹丸两侧形成低压区，故能形成空化。在攻角为 0°时，弹丸周围压力场呈对称分布，此时弹丸运动平稳，弹道稳定性良好；当攻角增加为 2°时，压力场没有发生明显变化；当攻角继续增大到 4°时，压力场开始发生变化，呈现出明显的不对称分布，且弹丸上部压力大于下部压力，这就使得弹丸会有倾覆的风险，影响弹丸的弹道稳

定性；当攻角为 6°时，这一现象越发明显。显然，攻角对弹丸的水下弹道稳定性有很大影响。

不同攻角弹丸运动时所受的升力和阻力曲线如图 6 所示。

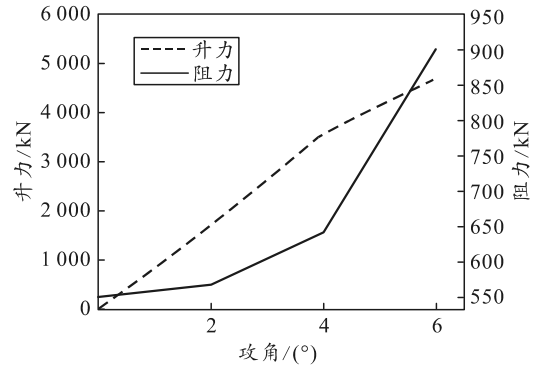
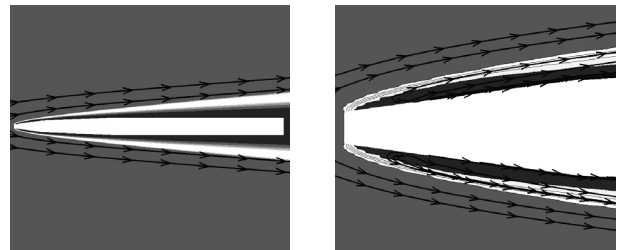


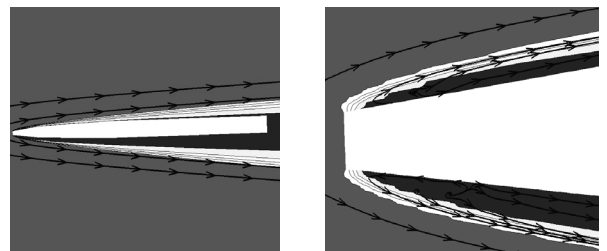
图 6 不同攻角弹丸所受升力和阻力曲线

由上图可以看出：随着攻角的增大，弹丸所受的升力呈先缓慢增大然后急剧增大的趋势，而弹丸受到的阻力呈先线性增大然后缓慢增大的趋势。在攻角为 0°和 2°时受到的阻力和升力都比较小，这是由于弹丸周围形成的超空泡能将弹丸完全包裹，减小了弹丸的受力。可见，攻角对弹丸的受力特性有很大影响，攻角越大，弹丸所受的升力和阻力越大。

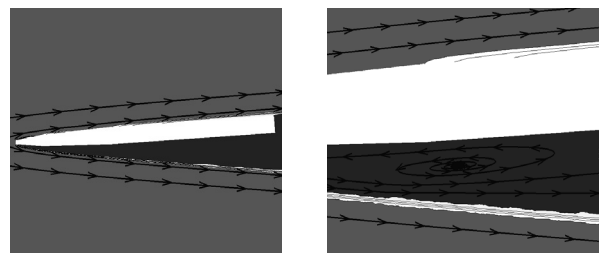
图 7 为不同攻角下的流体速度矢量图。



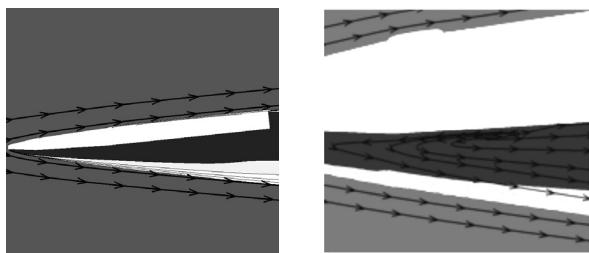
(a) 0°攻角



(b) 2°攻角



(c) 4°攻角



(d) 6°攻角

图7 不同攻角下的速度矢量

由上图可以看出：不同攻角下，弹丸周围的流体流动方向是不同的。由图7(a)可以看出，在0°攻角时，弹丸周围液体和气体沿弹丸轴线对称流动。此时弹丸头部上下两侧出现对称的2个涡流，而涡流处气体流速大、压力小，这就为空泡的形成提供了条件。弹丸此时受力均衡，弹道性能较好。由图7(b)可以看出，在2°攻角时，弹丸头部上下两侧也出现了涡流，但相对于0°攻角时的状态，此时的涡流位置已经出现轻微偏移，不再是对称分布。弹丸周围压力场没有明显变化，这对弹丸的受力特性以及弹道性能影响较小。由图7中(c)和(d)可以看出，在4°和6°攻角时，弹体周围的流体不再呈对称分布，且不再在对称位置出现涡流，只在弹体下侧出现涡流。此时弹丸上部压力大于下部压力，弹丸的受力特性以及弹道稳定性受到较大的影响。

4 结束语

笔者以超空泡射弹为研究对象，基于Rayleigh-Plesset方程和VOF多相流模型，建立了射弹水下运动过程的数值模拟方法，分析了相同初速条件下，弹丸以不同攻角运动对运动过程中的空泡形态、流场演化及受力特性的影响。结果表明：弹丸运动时的攻角越大，弹丸的空化效果越差，不能形成完全包裹弹体的超空泡；随着攻角的增大，弹丸周围压力场会呈不对称分布，使弹丸受力不平衡，影响弹丸的水下弹道稳定性；弹丸在运动过程中受到的升力和阻力也会随攻角的增大而增大，这将严重影响弹丸的作战效能。

参考文献：

- [1] REICHARDT H. The laws of cavitation bubbles as axially symmetrical bodies in a 92 Flow[R]. Ministry of Aircraft Production Reports and Translations Britain, 1946(766): 322-326.
- [2] YAMASHITA S, TOGAMI K, SAEKI T, et al. Study of a hypervelocity underwater projectile[C]. Proceeding of the 24th International Symposium on Shock Waves, spring, Berlin, Heidelberg, 2005: 1303-1308.
- [3] 李强, 黄岚, 张学伟. 不同空化器对水下射弹动态减阻特性影响分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2018, 39(1): 1-5.
- [4] 张学伟. 水下超空泡射弹运动仿真与弹道特性分析[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [5] 蔡涛, 李强, 鹿麟, 等. 空化槽对弹丸水下运动特性的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(3): 36-40.
- [6] 刘立栋, 张宇文, 滕鹏桦. 水下高速射弹超空泡运动建模与仿真[J]. 应用力学学报, 2011, 28(5): 470-474, 553.
- [7] 施红辉, 周东辉, 周栋, 等. 水下连发超空泡射弹的流动与阻力特性研究[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(4): 771-779.
- [8] 曹红松, 姚养无, 何晓聪, 等. 水介质中高速运动弹丸的空泡效应数值仿真[J]. 火炮发射与控制学报, 2010(4): 12-14.
- [9] 熊天红, 李铁鹏, 易文俊, 等. 水下高速射弹超空泡形态与阻力特性研究[J]. 弹道学报, 2009, 21(2): 100-102.
- [10] 易文俊, 王中原, 熊天红, 等. 水下高速射弹超空泡减阻特性研究[J]. 弹道学报, 2008, 20(4): 1-4.
- [11] 袁绪龙, 张宇文, 杨武刚. 高速超空化航行体典型空化器多相流 CFD 分析[J]. 弹箭与制导学报, 2005(1): 53-55, 59.
- [12] 张纪华, 张宇文, 张博. 高速射弹流体动力特性及空泡形态数值仿真[J]. 计算机仿真, 2012, 29(4): 15-18, 59.
- [13] 张宇文, 袁绪龙, 邓飞. 超空泡航行体流体动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 1-3.
- [14] 张学伟, 李强, 黄岚. 基于6DOF超空泡射弹减阻性能分析[J]. 弹箭与制导学报, 2016, 36(5): 109-111, 141.
- [15] 孙士明, 颜开, 褚学森, 等. 射弹高速斜入水过程的数值仿真[J]. 兵工学报, 2020, 41(S1): 122-127.