

细长体射弹高速水平入水研究

王瑞琦, 黄振贵, 郭则庆, 陈志华, 刘如石

(南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 为研究射弹在水中航行的弹道特性, 对细长体射弹高速水平入水进行了实验, 并利用高速摄像机进行了自动同步拍摄, 研究了超空泡的形成和发展过程, 以及水箱底部 2 处位置在水下压力波影响下的压力变化趋势; 基于动网格技术模拟了射弹在水中的航行过程, 获得了射弹质心的位移、速度、加速度、射弹的偏转角度等物理量的变化规律, 通过对航行过程中空化现象的详细分析得到了射弹空化发生的部位。结果表明: 由于受水压力波影响, 射弹周围水域压力会出现突跃; 射弹航行过程中先在弹肩部位发生空化; 射弹航行过程中尾部在空泡内发生偏移以保证航行的稳定性。

关键词: 细长体射弹; 水下弹道; 超空泡; 实验研究

中图分类号: TJ303.4 文献标识码: A 文章编号: 1004-499X(2017)02-0047-07

Study on Horizontal Water-entry of Slender Projectile With High-speed

WANG Rui-qi, HUANG Zhen-gui, GUO Ze-qing, CHEN Zhi-hua, LIU Ru-shi

(National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To study the ballistic characteristics of the projectile in the water, the high-speed horizontal water-entry of slender projectile was experimented, which was automatically shot by using high-speed camera. The formation and development of the supercavitation were studied. The pressure variations of two points on the bottom of water tank were showed by pressure sensor. Based on the dynamic mesh method, the sailing process of the projectile was simulated, and the changes of the displacement, velocity, acceleration and the deflection angle of mass centre were obtained. The location of cavitation were obtained by analyzing the cavitation phenomenon. The results show that the water pressure around projectile sharply changes due to the effect of pressure wave. During the sailing process, the cavitation occurs at the shoulder of the projectile and the tail of the projectile is displaced to ensure sailing stability in the cavity.

Key words: slender projectile; underwater trajectory; supercavitation; experimental study

入水空泡是流体因入射体与液面撞击发生变形而产生的包裹入射体的含气空腔。当空泡完全包裹入射体时, 便会大幅减小入射体在水中的航行阻力, 目前, 制约水下航行体的航行存在 2 个障碍: ①航行阻力大, 因为水的密度是空气密度的 800 倍, 所以水下航行体的航行速度比空中飞行器的飞行速度低

2~3 个量级; ②伴随航行体空泡的形成、发展、稳定及溃灭受多种因素的影响, 复杂且难以控制, 并伴随振动等一系列不良后果, 对水下航行体的稳定性产生影响。故研究空泡的形成及发展等的复杂规律对提高水下航行体的速度和稳定性具有很大的意义。

曹伟^[1]对入水空泡发展过程进行了观测, 对空

收稿日期: 2017-02-22

基金项目: 国防预先研究基金项目(61426040303162604004); 中央高校基本科研业务费专项资金(30917012101)

作者简介: 王瑞琦(1992-) 男, 硕士研究生, 研究方向为水中弹道。E-mail: ruiqi138125@163.com。

通讯作者: 黄振贵(1986-) 男, 讲师, 博士, 研究方向为水中弹道。E-mail: hzgkeylab@njust.edu.cn。

泡的生成、发展、溃灭等现象给出了明确的物理描述。Minhyung^[2]发展了相关空泡动力学模型,预测了空泡表面闭合时间;Tadd^[3]较为全面地概括了这一领域前人所进行的大量实验、理论与数值分析。Aristoff^[4-5]对轻质球体垂直入水问题进行了研究,描述了球体动力学过程与球体速度衰减对空泡形态的影响;Guo^[6-7]对不同头型弹丸高速水平入水问题进行了实验与理论研究,提出了不依赖于空化数的阻力系数模型;Dulaux^[8]描述了大 We 数与 Re 数条件下,入水空泡从形成到溃灭的过程;Gao^[9]对2种头型的弹丸入水问题进行了数值模拟,讨论了空泡形状和蒸气相分布;张伟^[10]对速度在 35~160 m/s 的平头、卵形和截卵形弹体进行了入水实验研究,分析了弹体头部形状对入水弹道稳定性的影响;何春涛^[11]基于 VOF 方法和有限体积法,结合动网格技术,对回转体匀速垂直入水空泡进行了数值研究,研究了垂直匀速入水空泡形态随时间的变化规律;马庆鹏^[12]基于 VOF 多相流模型,利用动网格技术,研究了锥头圆柱体垂直高速入水空泡的演化过程。目前对于入水空泡的研究多基于物体低速入水情况下空泡的演变过程,而对于物体高速入水空化产生空泡的研究很少。

本文分别利用高速摄像实验法和基于动网格技术的 Mixture 多项流模型的数值方法,对细长体射弹高速水平入水开展研究。根据实验和数值结果,对射弹入水过程复杂的超空泡流动现象展开研究,探讨超空泡的形成、发展与稳定规律,讨论水下压力波的传播特性,并对射弹的3自由度运动规律进行分析。

1 实验系统与模型参数

实验系统如图1所示,射弹收集器、水箱和弹道枪均处于同一水平线上,并固定于实验台上。高速摄像机通过同步系统与弹道枪连接,实现自动同步拍摄,计算机分别连接高速摄像机和采集系统,用来控制高速摄像机的各个参数并记录所采集到的图像,并保存采集系统采集到的数据。

实验水箱有效容积为 465 mm × 100 mm × 100 mm,射弹收集器和弹道枪分别位于水箱的左右两侧,与水箱中心的距离均都为 732.5 mm。水箱左右两侧面中心位置设有 100 mm × 100 mm 的孔,实验前用塑料薄膜将其密封,防止水的流出,水由水箱上方注水孔注入水箱。高速射弹由弹道枪发射后穿透

塑料薄膜从水箱右侧孔射入水箱,然后穿透塑料薄膜从左侧孔射出,最后进入射弹收集器。高速摄像机通过水箱前方 250 mm × 100 mm 的观测窗口拍摄射弹在水中的高速航行姿态,以及超空泡的形成、发展和稳定过程;在水箱底部中心轴线上,距右侧窗口 50 mm 和 100 mm 处分别固定有2个与数据采集系统相连接的压力传感器,用于测量由于水中压力波造成的压力变化情况。

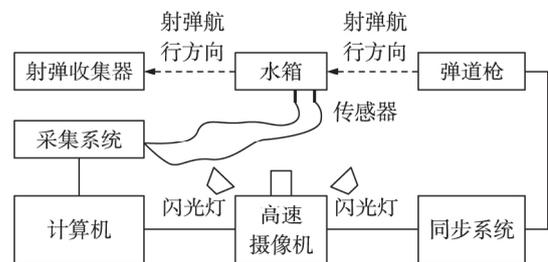


图1 实验装置示意图

射弹入水速度约为 250 m/s,是一个高瞬态过程,高速摄像机的拍摄速度和光源是实验成功的关键因素,拟采用 FASTCAM 高速摄像机,以 10 000 帧 s^{-1} 的速度对射弹入水全过程进行拍摄;光源采用与摄像机配套的闪光灯,以提高摄像的清晰度。射弹长度 $L=110$ mm,直径 $D=4.5$ mm, $L/D=24.4$,射弹头部为卵形头部,射弹圆柱部长度 $l=80$ mm。

2 数值方法与计算模型

2.1 控制方程

假设流体不可压缩,采用 Mixture 多相流模型来描述空气、水、蒸气形成的多相流动,并忽略入水过程中由于流体粘性所产生的热效应,连续性方程和动量方程则可写为

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_i} (\rho_m u_m) = 0 \quad (1)$$

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

式中: X_i 代表 x, y, z ; $\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$ 为混合相密度;

$u_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k u_k}{\rho_m}$ 为混合相速度; \mathbf{F} 为体积力;

$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k$ 为混合相的动力粘度; $u_{dr,k} = u_k - u_m$ 为

副相 k 的迁移速度; n 为多项流的相数; α_k 为不同相的体积分数, $\sum \alpha_k = 1$ 。

2.2 空化与湍流模型

入水过程中液态水的空化采用 Schnerr-Sauer 空化模型计算 蒸气相的输运方程为

$$\frac{\partial \alpha_v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_i} (\alpha_v u_v) = F_{\text{vap}} \frac{3\alpha_{\text{muc}}(1-\alpha_v)}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l}} - F_{\text{cond}} \frac{3\alpha_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l}} \quad (3)$$

式中: R_B 为气核半径 F_{vap} 和 F_{cond} 为经验常数 α_{muc} 为不可凝结气体体积分数, α_v 为液相蒸发的体积分数 u_v 为蒸气相速度 p_v 为蒸气压力 p 为非凝结气体的压力 ρ_l 为水的密度。

因水的粘性系数较大 粘性不可忽略 因此采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型求解入水和水中航行的湍流运动。湍动能 k 和湍流耗散系数 ε 的输运方程为

$$\frac{\partial (\rho_m k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m k u_m)}{\partial X_i} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_k} \right) \frac{\partial k}{\partial X_i} \right] + G_k + G_b - \rho_m \varepsilon \quad (4)$$

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

式中: μ 为混合湍流粘度; μ_t 为分散相湍流粘度; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能生成相; G_b 为浮力引起的湍动能生成相; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ 为经验常数; Pr_k, Pr_ε 分别为 k 和 ε 的湍流普朗特数。

2.3 计算模型与方法

计算域如图 2 所示 其大小为 $630 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 其中水域与实验水箱一致 大小为 $630 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。射弹以 250 m/s 的速度从空气域中水平进入水域, 射弹在水中航行时间极短 因此为降低计算的难度和复杂度 将计算模型简化为 2D 模型。射弹头部与水域右边界的距离为 10 mm 。以初始时刻射弹的质心位置为坐标原点 水平向左指向射弹运动方向为 x 正方向 垂直向下为 y 正方向 利用网格划分软件进行三角形网格划分。

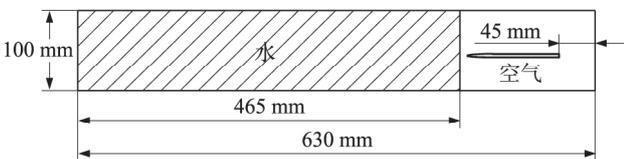


图 2 射弹水平入水模型图

水与空气的密度分别为 998.2 kg/m^3 和 1.225 kg/m^3 , 饱和蒸气压为 $3\ 540 \text{ Pa}$ 。空气域环境压强为 $101\ 325 \text{ Pa}$, 温度为 300 K , 重力加速度为 9.8 m/s^2 , 方向铅垂向下。流场上侧、下侧边界为固定壁, 左侧、右侧边界为压力出口。

对控制方程的离散采用有限体积法 对压力场与速度场的耦合求解选用 SIMPLE 算法 其中对压力场的空间离散采用 PRESTO! 格式 对流项的离散采用 QUICK 格式; 对时间项则采用 3 阶龙格-库塔法 (R-K) 进行离散。

计算过程中先计算射弹所处的空泡流场 然后计算出射弹的受力 最后利用基于弹簧光顺法和局部网格重构法的动网格技术嵌入用户自定义函数 (UDF) 求解每一时刻射弹的 3 自由度运动参数 并确定下一时刻计算时射弹在计算域中的具体位置 依次往复完成整个计算过程。

3 实验结果分析

由不同时刻摄像揭示的实验中射弹在水箱中的航行与超空泡形态演变全过程如图 3 所示。

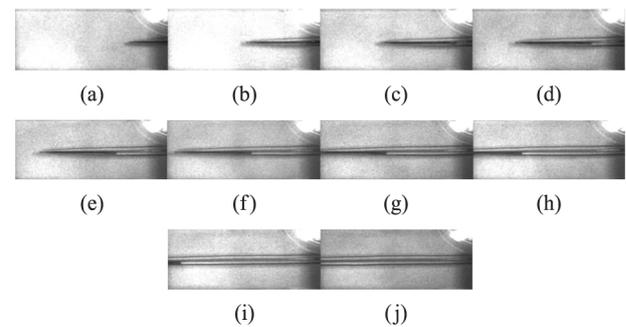


图 3 射弹在水箱中的航行轨迹图

由图 3 可清晰看出射弹的轮廓和超空泡壁面, 位于超空泡中间的黑色长条为实验所用细长体射弹。图 3(e) ~ 图 3(i) 中射弹尾部的浅黑色条状物为尾流, 可知射弹在水中航行过程中形成了狭长的圆柱形超空泡。由图 3(a) ~ 图 3(d) 可知, 当射弹入水后 迅速在射弹头部形成入水空泡。随着射弹的继续航行至完全入水, 入水空泡逐渐延长并将整个射弹完全包裹住, 形成超空泡。由于射弹航行速度较快 且高速摄像机拍摄时间较短 因此从水箱观测窗口拍摄到的超空泡形态较为稳定 未能拍摄到超空泡的溃灭过程 射弹的航行轨迹也未发生明显的变化 射弹在水中具有较好的航行稳定性 但是在射弹后期的航行过程中 射弹尾部略微向下偏转 如

图4中的射弹航行流场放大图所示。

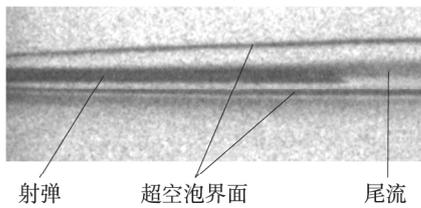


图4 某时刻射弹航行流场放大图

图5为4次实验射弹在同一个时刻的航行轨迹与空泡对比图。图中显示差异是由于拍摄途中光线差异和系统增益值不同的原因引起的,该图很好地揭示了射弹尾部的偏转现象。

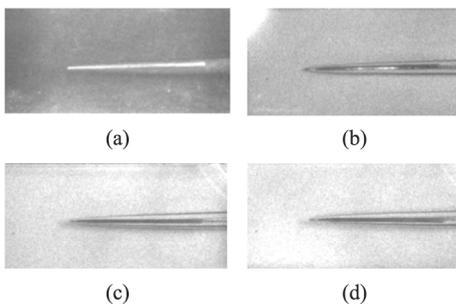


图5 4次实验同一时刻射弹的航行轨迹与空泡形状对比图

超空泡航行体的稳定机制根据航行速度 v 的大小可分为3种,分别为抬式稳定机制($v \leq 300$ m/s)、弹力稳定机制(300 m/s $< v < 1\,000$ m/s)和气动稳定机制($v \geq 1\,000$ m/s)^[13]。而抬式稳定机制又可分为双空泡流稳定机制($v \leq 70$ m/s)和空泡内壁滑移稳定机制(50 m/s $< v < 300$ m/s)。根据实验数据可计算出射弹在水箱中的航行速度范围为240~270 m/s,因此,本实验射弹的稳定机制属于空泡内壁滑移稳定机制,由图5可知,图5(a)和图5(b)中射弹尾部向上偏斜,射弹沿上壁面稳定滑移航行,图5(c)和图5(d)中射弹尾部向下偏斜,射弹沿下壁面稳定滑移航行。以射弹沿下壁面稳定滑移航行为例,分析射弹在空泡内部的受力情况,射弹尾部沿空泡内壁稳定滑移产生尾部的浮力,在各力作用下使射弹达到稳定。

图6为利用2个压力传感器得到的数据并拟合出来的2组压力变化曲线图。由于实验条件限制,压力传感器只能安装在水箱底部,由于所分析的采集数据仅限制在弹丸穿过的前后瞬间,此时压力波反射还没传播过来,因而可忽略水下压力波与水箱底部作用后发生反射等边界效应。在处理传感器压力值时,设置了参考值 $p_0 = \rho gh_0$, ρ 为水的密度, g 为

重力加速度, h_0 为水箱中水的深度,故传感器压力显示值为 $p' = p_r - p_0$, p_r 为传感器位置实际压力。在初始阶段,压力传感器所处位置未受到水下压力波的影响,压力增加值 $p_1 = 0$,故 $p_r = p_1 + \rho gh_0 = p_0$,压力传感器值为0;而在末尾阶段,水中压力波逐渐减弱,导致压力增加值 p_1 下降;此外射弹穿透水箱两侧薄膜,水箱中水液面逐渐降低,有 $\rho gh - \rho gh_0 < 0$,当 $p_1 < |\rho gh - \rho gh_0|$ 时 $p' = p_r - p_0 = p_1 + \rho gh - \rho gh_0 < 0$,压力曲线为负值。由图可知,2个传感器获得的压力变化规律几乎一致,在压力波未传播到传感器处,压力未有任何变化,此后压力陡增,说明射弹的高速入水形成了较强的压力波;压力急速达到峰值后迅速下降,但下降的速度逐渐放缓。由于传感器1更靠近射弹入射口,所以传感器1处的压力先出现陡增,并先达到压力峰值,压力下降的时间也更早。因射弹在水中航行受到较大的阻力导致其速度有所降低,所诱导的压力波强度也随之减小,且压力波在传播过程中其强度会衰减,造成传感器2处的压力峰值比传感器1要小,但在下降后期两者的压力几乎相同。压力波在水中的传播、叠加以及射弹在水中的航行造成水的波动,使得压力在上升和下降过程中出现波动。

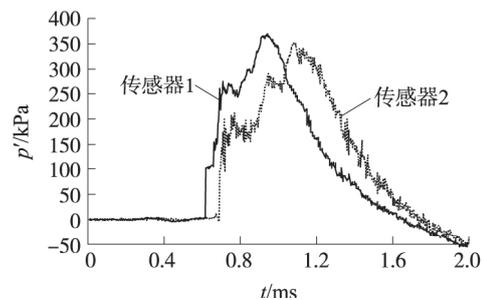


图6 传感器测得的压力变化曲线图

4 数值结果分析

图7为通过数值计算得到的不同时刻射弹在水域中的航行轨迹和超空泡演变图,图8为不同时刻蒸气相分布云图。由图7看出,当射弹进入水域后,会在其周围形成一个与外界大气相通的开空泡,因射弹速度较高,该气泡无法在射弹两侧壁面处闭合;在射弹入水处自由液面上升,高出未扰动液面,随着射弹在水中的运动,空泡在水面以下继续向下扩张。当 $t = 0.1$ ms 和 $t = 0.3$ ms 时,射弹入水处的水质点沿射弹轴线平行向空气中运动,并逐渐升高;从 $t = 0.5$ ms 时刻开始,空泡的上下两侧界面逐渐向弹轴

收缩,直到 $t = 0.9 \text{ ms}$ 时表面闭合,最终将空泡与空气域隔开。

图 8 反映了超空泡形成、发展过程中水蒸气相的体积分数云图。从图中可看出,在射弹入水后即刻发生空化现象,空泡逐步将弹体包裹住。由

0.2 ms 时刻的图可知,压力首先在射弹弹肩处降低到水的饱和蒸气压并产生空化,随着射弹的运动,水蒸气不断增多,空泡随之不断扩张;在 0.5 ms 时刻,空化产生的水蒸气已经包裹整个射弹,水蒸气随着射弹的运动逐渐伸长。

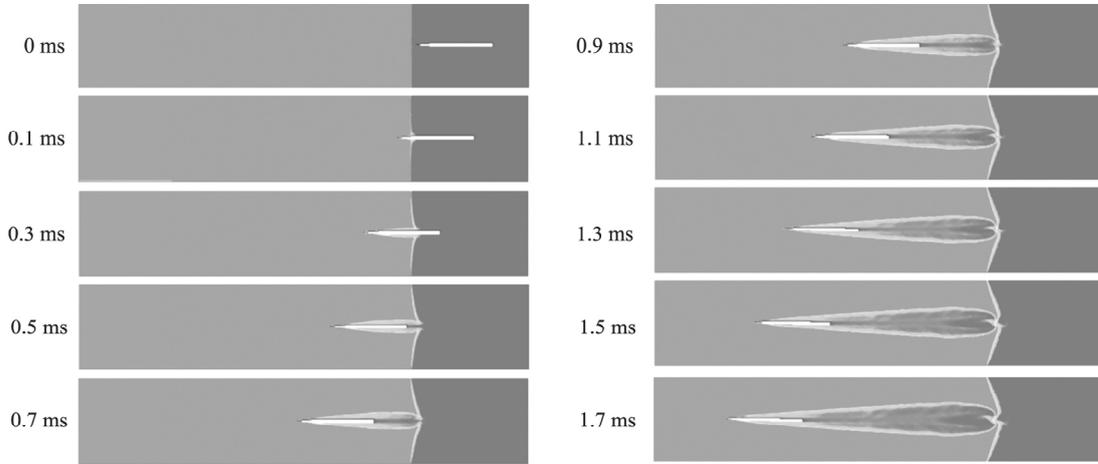


图 7 水域中射弹的航行轨迹和空泡图

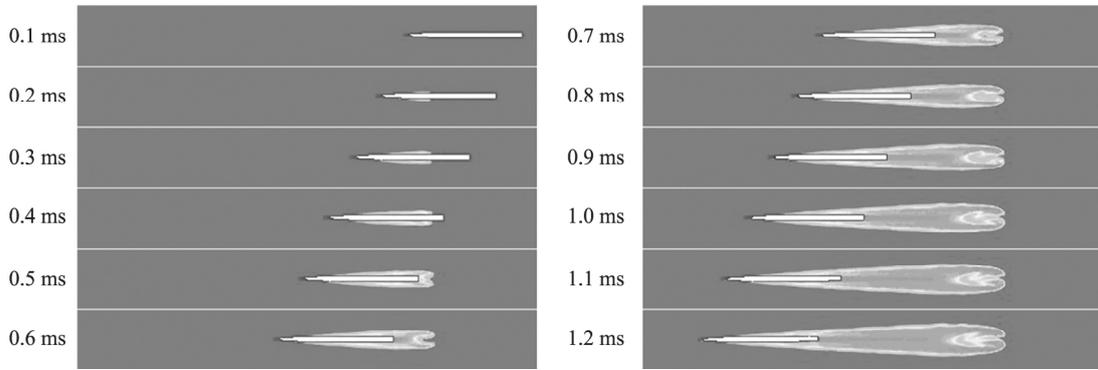


图 8 不同时刻蒸气相分布云图

在计算过程中同样选取了与实验位置相同的 2 个监测点,图 9 是 2 个监测点的压力变化曲线。由图 6 和图 9 知,从获得压力开始到峰值压力,再到压力降至最低所历时总时间均为 1 ms 左右,但是图 9 的波形相对图 6 较窄,整体上比较规则,而图 6 的波形比较复杂,这是由于水箱中压力波相互作用的结果。计算格式阶数的限制导致压力上升,并未出现实验中陡增的现象。图 6 中传感器 2 峰值压力与图 9 中监测点 2 峰值压力分别为 378.04 kPa 和 391.45 kPa,两者相差 13.41 kPa,这是由于水箱上方有一个直径为 60 mm 的注水孔,而在数值计算中该注水孔假定为固体壁面,故数值计算得出来的值相对实验得出来的值较大,但在可接受的范围,可认为数值计算结果与实验是一致的。

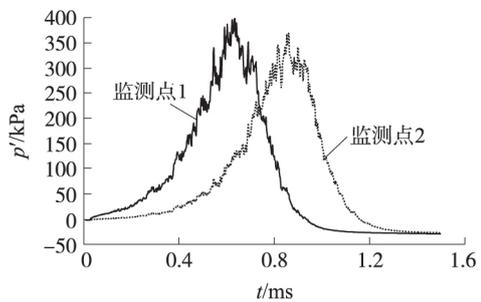


图 9 监测点压力变化曲线

图 10 显示了射弹航行过程中的质心位移的变化,图 11 是射弹航行过程中弹丸轴线与 x 轴夹角 β 的变化曲线,反映了射弹航行过程中偏转角度的变化,图 10 和图 11 说明射弹在航行过程中射弹尾部逐渐向下偏斜,与实验结果一致。

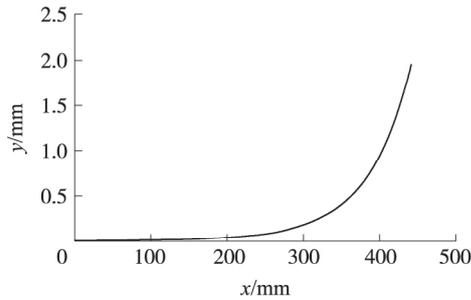


图10 射弹质心位移坐标变化

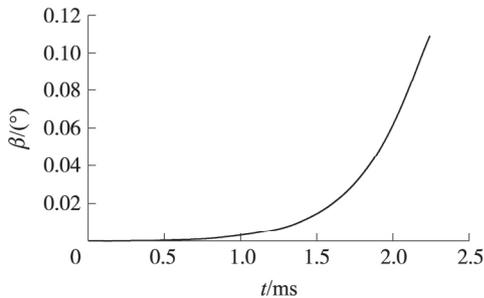
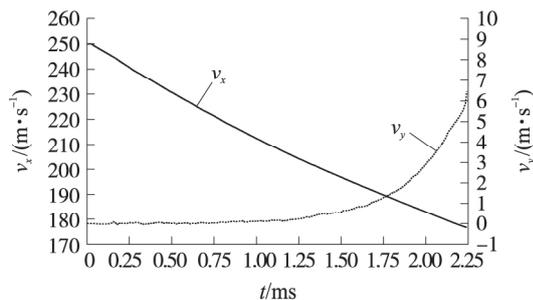
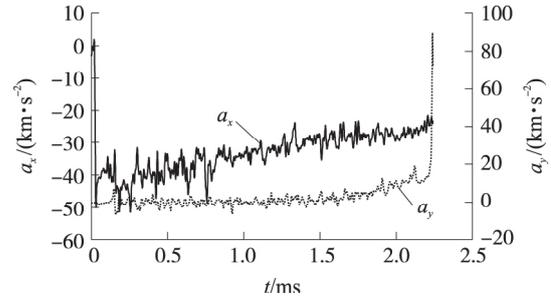


图11 射弹偏转角度随时间的变化

图12和图13分别为射弹质心 x 和 y 方向速度(v_x, v_y)与加速度(a_x, a_y)随时间的变化曲线。由图12可知,在整个航行过程中,由于阻力的作用,射弹 x 方向速度随时间几乎呈直线下降的趋势;而 y 方向的速度在 $t < 1.25$ ms几乎没有任何变化,此后呈现抛物线增长。由图13可知,在射弹入水瞬间,射弹承受极大的阻力作用,此后其沿 x 轴负方向随时间呈现波动变化,但振幅中心几乎为线性上升;空泡形态的非定常变化导致射弹两侧受力并不均匀,故在 y 轴方向存在加速度。射弹入水前期,射弹扰动的累积效应较小,导致加速度 a_y 保持在 10 km/s^2 以下;在射弹末端时刻,即 2.25 ms左右,射弹头部极为接近左侧边界,射弹受到较大的扰动,导致 a_y 急剧上升,但由于此后运动时间极短($t < 0.01$ ms),故速度 v_y 变化并不明显。

图12 射弹 x 和 y 方向的速度图13 射弹 x 和 y 方向的加速度

5 结束语

通过高速摄像机对细长体射弹高速水平入水进行了实验研究,拍摄记录了射弹高速入水所形成的超空泡形态和射弹航行轨迹,揭示了射弹入水航行过程中超空泡流动的复杂情况。结果表明,射弹包裹在超空泡内并能保持稳定的航行姿态。

此外,利用数值计算方法模拟了该射弹高速水平入水过程,得到了射弹入水空泡形成的过程、空泡流动演变趋势以及水域中某点处压力的变化趋势,数值计算结果与实验结果吻合较好。分析了射弹质心的位移、速度、加速度、偏转角度等物理量。结果表明射弹尾部在空泡内部发生偏移,验证了实验现象。通过研究射弹航行过程中的空化现象,可知压力在射弹的弹肩处先降到水的饱和蒸气压而发生空化。

参考文献

- [1] 曹伟,王聪,魏英杰,等.自然超空泡形态特性的射弹试验研究[J].工程力学,2006,23(12):175-179.
CAO Wei, WANG Cong, WEI Ying-jie, et al. High-speed projectile experimental investigations on the characteristics of natural supercavitation[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(12): 175-179. (in Chinese)
- [2] LEE M. Water entry induced cavity pressure [J]. KSME International Journal, 2000, 14(5): 562-568.
- [3] TADD T T, BRENDEN P E, JESSE B. Water entry of projectiles [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2013, 46: 354-378.
- [4] ARISTOFF J M, TRUSCOOT T T, ALEXANDRA H, et al. The water entry of decelerating spheres [J]. Physics of Fluids, 2010, 625: 135-165.
- [5] ARISTOFF J M, BUSH J W M. Water entry of small hydrophobic spheres [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 619: 45-78.
- [6] GUO Z T, WEI Z, XIAO X K, et al. An investigation into horizontal

- water entry behaviors of projectiles with different nose shapes [J]. *International Journal of Impact Engineering* 2012, 49: 43-60.
- [7] GUO Z T, ZHANG W, WANG C. Experimental and theoretical study on the high-speed horizontal water entry behaviors of cylindrical projectiles [J]. *Journal of Hydrodynamics* 2012, 24(2): 217-225.
- [8] DULAUX V, CAILLE F, DUEZ C, et al. Dynamics of transient cavities [J]. *Journal of Fluid Mechanics* 2007, 591: 1-19.
- [9] GAO J G, CHEN Z H, MA J. Numerical simulation of the water entry of two head shapes bullet [C]// *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. USA: IEEE, 2015: 584-587.
- [10] 张伟, 郭子涛, 肖新科, 等. 弹体高速入水特性实验研究 [J]. *爆炸与冲击* 2011, 31(6): 579-584.
ZHANG Wei, GUO Zi-tao, XIAO Xin-ke, et al. Experimental investigations on behaviors of projectile high-speed water entry [J]. *Explosion and Shock Waves* 2011, 31(6): 579-584. (in Chinese)
- [11] 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 Chun-tao, WANG Cong, MIN Jing-xin, et al. Numerical simulation of early air-cavity of cylinder cone with vertical water-entry [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(4): 237-243. (in Chinese)
- [12] 马庆鹏, 魏英杰, 王聪, 等. 锥头圆柱体高速入水空泡数值模拟 [J]. *北京航空航天大学学报* 2014, 40(2): 204-209.
MA Qing-peng, WEI Ying-jie, WANG Cong, et al. Numerical simulation of high-speed water-entry cavity of cone cylinder [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(2): 204-209. (in Chinese)
- [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.
ZHANG Yu-wen, YUAN Xu-long, DENG Fei. *Fluid dynamics of supercavitating underwater vehicles* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)

(上接第 12 页)

- [7] 牛春峰, 刘世平, 王中原. 高速旋转弹位置与姿态测量数据分析方法 [J]. *火力与指挥控制* 2012, 37(5): 89-92.
NIU Chun-feng, LIU Shi-ping, WANG Zhong-yuan. Estimate position and attitude of high-speed rotating projectile [J]. *Fire Control & Command Control* 2012, 37(5): 89-92. (in Chinese)
- [8] 秦永元. 卡尔曼滤波与组合导航原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2012.
QIN Yong-yuan. *Kalman filter and the theory of integrated navigation* [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2012. (in Chinese)
- [9] 赵琳. 非线性系统滤波理论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
ZHAO Lin. *Nonlinear system filtering theory* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [10] MERWE R V D, WAN E, JULIER S. Sigma-point Kalman filters for nonlinear estimation and sensor-fusion applications to integrated navigation [C]// *Proceeding of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*. Rhode Island, USA: AIAA, 2004: 1-30.
- [11] 段笑菊, 薛晓中. UKF 与 EKF 在 GPS/INS 超紧组合导航中的应用比较 [J]. *火力与指挥控制* 2010, 35(6): 60-63.
DUAN Xiao-ju, XUE Xiao-zhong. Comparison between extended and unscented Kalman filtering applied to ultra-tight GPS/INS integration [J]. *Fire Control & Command Control* 2010, 35(6): 60-63. (in Chinese)
- [12] 宋丕极. 枪炮与火箭外弹道学 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1993.
SONG Pi-ji. *Exterior ballistics of guns and rockets* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993. (in Chinese)
- [13] 丁传炳, 王良明, 郑翠翠. 单天线 GPS 姿态测量系统在制导火箭中的应用 [J]. *空间科学学报* 2010, 30(6): 607-611.
DING Chuan-bing, WANG Liang-ming, ZHENG Cui-cui. Research on the application of single-antenna GPS measurement system on guided rocket [J]. *Chinese Journal of Space Science* 2010, 30(6): 607-611. (in Chinese)
- [14] KORNFELD R P, JOHN H R, DEYST J J. Single-antenna GPS-based aircraft attitude determination [J]. *Navigation*, 1998, 45(1): 51-60.
- [15] 邱海迪, 李嘉, 牛春峰, 等. 高转速弹丸姿态解算方法研究 [J]. *四川兵工学报* 2016, 37(2): 7-10.
QIU Hai-di, LI Jia, NIU Chun-feng, et al. Research on attitude algorithm for projectile with high spinning speed [J]. *Journal of Sichuan Ordnance* 2016, 37(2): 7-10. (in Chinese)