

弹丸高速斜侵彻入水流场显示的初步研究^{*}

周 杰, 徐胜利, 彭 杰

(清华大学航天航空学院, 北京 100084)

摘要:为认识弹丸高速斜侵彻入水的气/水界面变形破碎、入水空泡和水中冲击波传播, 利用可变发射角立式二级轻气炮发射高速弹丸, 结合高速激光阴影和纹影流场显示, 给出了高速弹丸斜侵彻入水流场的演化图像。结果表明: 当弹丸速度在 350 m/s 附近时, 弹丸尾部气流会越过弹丸头部产生冲击波, 因为时间短且水惯性大, 冲击波在气/水界面反射但不会影响弹丸姿态和气/水界面。弹丸斜侵彻在水中产生冲击波系, 气/水界面发生形变和破碎(“碎片云”), 水中产生冲击波系和空化气泡区, 难以识别气泡和“碎片云”的边界, 不同头部构型弹丸会影响气泡和“碎片云”体积大小以及水下弹道稳定性。弹丸速度为 1.8 km/s 时, 碎片云体积大于水下空泡体积, 但流场结构和 350 m/s 情形相似。采用立式二级轻气炮和流场显示系统, 为研究高速弹丸斜侵彻入水现象提供了新的途径。

关键词: 二级轻气炮; 高速入水; 气/水界面; 空泡; 冲击波

中图分类号: O353.4

文献标识码: A

弹丸高速入水经历跨介质(气、水物性参数突变)高度非定常动态冲击过程, 涉及气/水界面大变形甚至破碎、空化及多相流动、冲击载荷引起的流固耦合及结构大变形与破坏, 是固体力学和流体力学交叉的难题^[1-2]。水的剪切强度为零, 弹水侵彻过程中气/水界面极易发生大变形和破碎。此外, 弹体结构受冲击作用产生应力波和动态破坏, 弹载机电系统因承受高过载而失效, 尾部卷入空气或出现空化气泡的膨胀和溃灭, 水中产生冲击波和膨胀波系等, 力学现象复杂, 难以建立全过程计算分析模型, 因此, 获得入水全过程的流场演化图像, 有助于认识其唯象规律^[3-4]。

早期研究主要针对弹丸低速入水的空泡发展、入水弹道和阻力系数等^[5-7]。Cheong 等^[8-9]研究了不同长细比及加载条件下细长体受入水冲击载荷作用的动态屈服关系, 获得了入水冲击屈服准则。Shi 等^[10]研究了不同角度、头型和长径比的细长体垂直入水现象, 流场高速摄影图像显示, 入水空化对水下弹道影响较大。Truscott 等^[11-12]利用粒子图像测速系统(Particle Image Velocimetry, PIV)测量了钢球入水空泡速度场, 研究了旋转球入水空泡的形态及流体动力变化特性, 得到了完全入水临界角和斜入水空泡变化过程。Grumstrup 等^[13]研究了入水空泡表面波纹现象, 结合声场变化, 分析了空泡壁振动及其内部特征。张伟等^[14]利用气体炮和高速摄影研究了平头、卵头和截卵形弹丸入水弹道稳定性, 建立了平头弹入水的空泡形状分析模型。利用二级轻气炮和高速摄影, Guo 等^[15]研究了初速度为 100~600 m/s 的小质量弹丸水平入水现象, 分析了入水速度、穿透深度和空泡半径等参数随时间变化关系, 给出了归一化后的弹丸速度和穿透深度的关系, 研究了 CRH(卵形曲线半径和弹丸直径比)对结果的影响, 并用商业软件 AUTODYN 进行了计算。Yao 等^[16]对细长体垂直入水进行了实验和理论研究, 给出了其射弹动力学特性以及中等速度对应的空泡演化, 尤其是空泡深闭合前的表面闭合; 基于

* 收稿日期: 2017-01-11; 修回日期: 2017-04-06

基金项目: 中国博士后科学基金(2015M581081); 中国运载火箭技术研究院基金(CALT201601); 清华大学自主课题(20161080102)

作者简介: 周 杰(1986—), 男, 博士, 主要从事超声速弹丸入水现象研究. E-mail: Beijihu1986@163.com

通信作者: 徐胜利(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事水下爆炸研究. E-mail: slxu@mail.tsinghua.edu.cn

Rayleigh-Besant 问题的解,得到了描述空泡形状演化的理论模型,在细长体入水初始阶段可忽略重力影响,但该阶段后期需要考虑重力影响。空泡演化对弹道稳定性有非常重要的影响。Truscott 等^[17]综述了基于形成机理的空泡分类和入水主要参数,概述了卷入空气射弹(包括空泡形成条件、初始冲击、空泡分类及形状、非对称空泡和低速斜入水、空泡和射弹动力学模拟、冲击动力学模拟等)和超空泡射弹(包括超空泡形成条件、超空泡模拟和高速入水、射弹稳定性、入水弹道设计)等方面的研究进展。高、低速射弹入水空泡形成的物理机制不同,对于低速入水,卷入空气气泡是当毛细数大于临界值时形成的,非对称气泡性状是由几何非对称性、横向自旋或表面润湿性等因素产生的。入水雷诺数高时,采用势流理论可模拟气泡和射弹动力学特性,射弹形状和空化数决定自然空化气泡能否维持,空中飞行的大长径比超空泡射弹通过尾翼稳定并抑制自旋,水中航行射弹靠斜支撑在气/水界面实现稳定,高速入水弹道设计应考虑超空泡动力学。Truscott^[17]指出了需研究的问题:(1)表面闭合气泡动力学实验和理论研究,即空泡形状、轨迹与 Froude 数、雷诺数及作用力的关系;(2)水蒸气如何进入空泡并影响其演化;(3)需发展在线高保真测量传感器,获得加速度、表面应力、弹水接触线位置和空泡压力等数据。利用流场显示和动态应变测量系统,黄彪等^[18]在水洞中研究了水中弹丸空化流场,获得了空泡断裂和脱落现象的变化过程及特征频率等。罗小鹏^[19]和左金东^[20]采用可变发射角立式二级轻气炮发射超声速弹丸,利用光反射测量弹丸出口速度,采用连续激光和脉冲火花纹影成像系统,研究了超声速弹丸近水面侵彻及其流场特征。

与采用落体方式的低速入水不同,弹丸高速入水需研制质量和速度在较大范围变化的发射系统,动态过程和高过载也使弹水侵彻冲击的弹载测量变得困难,因此,可从气/水界面附近的流场显示入手。和弹丸与固体的侵彻现象类似,弹水侵彻涉及多个物理力学机制,速度、尺度、气-汽-液三相流、临界饱和和压力、惯性力等变量会以不同无量纲参数形式表征,因此,弹入水侵彻难以得到简洁和普适的经验公式。本研究采用立式可变发射角二级轻气炮加速质量约 350 g、速度为 300~400 m/s 的弹丸,采用高速纹影和阴影流场显示代替常用的高速摄影,观察入水前、后近弹水流场变化,特别是水中冲击波系的产生和传播。

1 实验和测量方法

利用可变发射角立式二级轻气炮发射指定质量和速度的弹丸。通过改变膜片材料、厚度和刻槽深度,可改变弹丸速度。采用高速纹影和阴影方法显示流场,根据高速阴影照片判读弹丸入水前速度。初步研究了不同头部形状、尺寸及速度的弹丸的入水过程。

1.1 实验装置

图 1(a)为“L”构型立式二级轻气炮示意图。压缩管离地面 5 m、长 6 m、内径 125 mm,发射管内径 40 mm、长 6 m。压缩管和发射管夹持预置裂纹的铝膜。采用高压空气驱动压缩管内的重活塞(40 kg),集气腔和压缩管滑动连接,压缩管两端采用固定于支架的液压阻尼缸支撑,以消除活塞冲击法兰引起的压缩管轴向位移,发射管可沿压缩管轴线旋转并改变弹丸发射角(见图 1(b))。实验前,将弹托、弹丸和膜片依次装入发射管。采用空压机向储气罐充气至 1.1 MPa。实验时,打开气动阀,高压空气由储气罐进入充气腔。重活塞击发由尾部高压空气推动,充气腔内预先充入的高压空气由进气槽进入重活塞尾部后,推动重活塞在压缩管内做加速运动,将活塞上游空气压缩至高温高压状态。当膜片破裂后,被压缩的高温高压空气由集气腔进入预先抽真空的发射管,推动弹托向前加速运动。弹丸和弹托在弹托捕捉器处实现分离,弹丸随后进入实验舱。实验后拆下夹膜段,更换膜片、弹托和弹丸。通过将储气罐内的高压空气充入集气腔,将活塞压回充气腔初始位置。集气腔末端的阻尼缸有吸能缓冲作用,防止膜片提前破裂导致压缩终点剩余速度较大的活塞冲击支架并损坏设备。与火药燃气(火药炮)相比,该设备装拆和操作安全简便,实验周期短且无含硝基燃气腐蚀管道内壁。除摩擦力外,该设备轴向和径向均不受力,安全性较高。

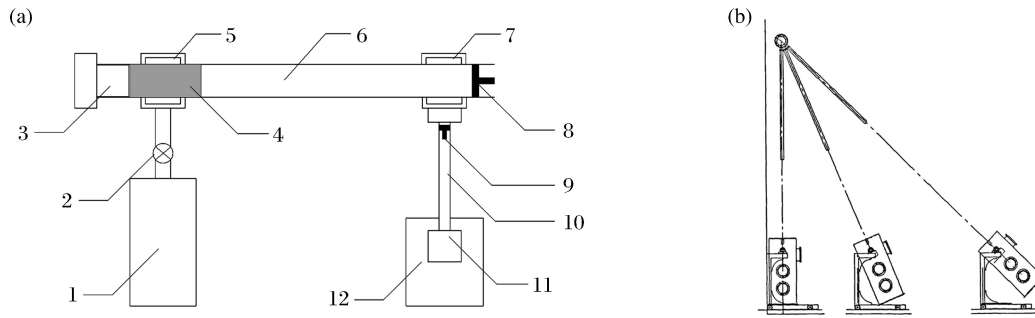


图 1 立式二级轻气炮结构(1. 高压储气罐;2. 气动球阀;3. 平衡活塞;4. 重活塞;5. 充气腔;6. 压缩管;7. 集气腔;8. 液压阻尼缸;9. 弹丸;10. 发射管;11. 弹托捕捉器;12. 实验舱)

Fig.1 Schematic of vertical second-stage gas gun (1. High pressure gasholder;2. Pneumatic ball valve;3. Balance piston;4. Heavy piston;5. Inflation chamber;6. Compression tube;7. Gas-collecting chamber;8. Hydraulic damping cylinder;9. Projectile;10. Launching tube;11. Sabot catcher;12. Chamber)

弹托捕捉器是本实验系统的关键部件,目的是防止弹丸尾部气流影响入水过程。图 2 为弹托捕捉器示意图。紧凑型的弹托捕捉器和发射管连接,由真空接口、弹丸测速装置和侧向泄气孔等集成起来。在弹托分离过程中,弹托碎裂易造成尾部高压空气进入测速段,高压空气使 BOPP 膜片破裂并越过弹丸头部,导致弹丸入水前的气/水自由面失稳,影响弹丸和气/水自由面侵彻角度。弹托捕捉器的泄气孔非常重要,其直径要尽可能大,泄放气流应不影响测速段和气/水自由面,避免或减少高压空气从膜片破裂处溢出,以保证弹丸飞行姿态稳定。另外,增加发射管末端 BOPP 膜片厚度,或在测速段附近开设泄气孔,都可减少气流对弹丸入水前气/水界面的干扰。要说明的是:尽管采用了上述措施,在大质量和亚声速弹丸情况下,仍会有尾部高压空气越过弹丸头部,影响弹丸入水前的空气流场。

1.2 流场显示

采用高速激光阴影显示气/水界面附近流场。根据参考长度和高速阴影照片时间间隔给出弹丸速度。作为比较,还采用了激光通断法测量弹丸速度。图 3 为连续激光光源(型号 DSG-8,波长 532 nm,输出功率 0~8 W)阴影光路示意图。激光器光束能量呈高斯分布,经过匀化器(准直器和光纤)将激光能量均匀化处理,得到平顶(非高斯)能量分布的激光束,避免线激光扩束后能量沿光束截面分布不均匀。匀化后的光束经凸透扩束镜和凹球反射镜 I(焦距 2.5 m),产生近似平行光束,进入观察窗,并由凹球反射镜 II 将平行光束汇聚到带长焦镜头(焦距 80~200 mm)的高速 CCD 相机。CCD 相机可手动触发或由光电测速信号转化后的 TTL 电平外触发。需指出的是:平行光应垂直入射观察窗玻璃(K9 玻璃),以避免光折

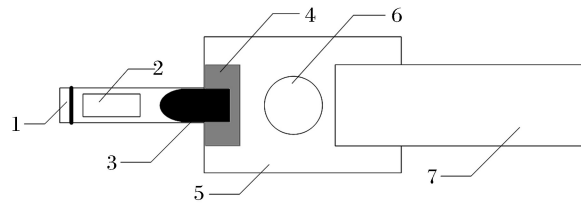


图 2 弹托捕捉器(1. BOPP 膜片;2. 泄气口;3. 弹丸;4. 弹托;5. 泄气腔;6. 泄气口;7. 发射管)

Fig.2 Sabot catcher (1. BOPP film;2. Gas outlet;3. Projectile;4. Sabot;5. Venting chamber;6. Gas outlet;7. Launching tube)

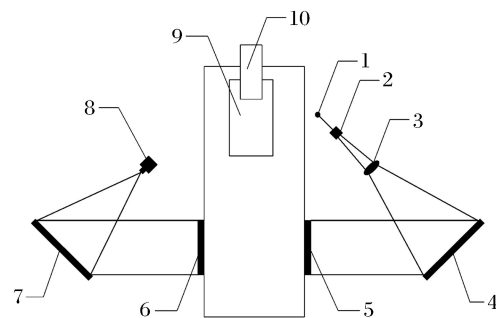


图 3 激光光源阴影光路(1. 激光;2. 匀化器;3. 扩束镜;4. 凹球反射镜 I;5. 6. 观察窗;7. 凹球反射镜 II;8. 高速 CCD 相机;9. 弹托捕捉器;10. 发射管)

Fig.3 Schematic of laser shadowgraph system (1. Laser;2. Homogenizer;3. Beam expander;4. Concave mirror I;5,6. Observation window;7. Concave mirror II;8. High-speed CCD camera;9. Sabot catcher;10. Launching tube)

射。在气炮运行过程中,置于导轨上、可前后运动的实验舱,其小幅振动会造成光束略微偏转。为避免弹托捕捉器侧向泄放高压气体及弹丸尾部气流冲击气/水界面(水雾)影响光学系统,实验舱外侧搭建开有透光孔的透明塑料帘围栏。

2 结果分析和讨论

研究 3 种头型的弹丸,即锥角分别 60° 、 90° 的锥柱和截锥柱(见图 4),入水角度(弹丸轴线和水平方向夹角)呈 45° 。铝膜预制裂纹采用“V”形刻槽,深度分别为 1.0 和 0.7 mm。驱动活塞的高压空气压力为 1.1 MPa,CCD 相机的拍摄速率为 6400 帧/秒,曝光时间为 $2.0 \mu\text{s}$,空间分辨率为 480×480 像素。实验工况及弹丸参数见表 1,其中: v_1 、 v_2 分别为弹丸入水前和入水后的速度, η 为入水前、后弹丸速度的衰减率。

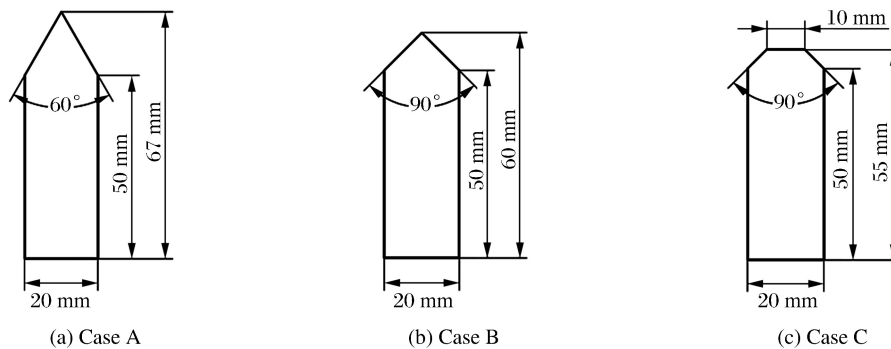


图 4 3 种弹丸结构

Fig. 4 Schematic of 3 kinds of projectiles

表 1 实验工况和弹丸参数

Table 1 Experimental conditions and projectile parameters

Exp. No.	Projectile type	Mass/g	$v_1 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_2 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\eta / \%$
Case A	Cone-cylindrical, 60°	53.4	350.5	331.6	5.4
Case B	Cone-cylindrical, 90°	52.8	361.9	342.3	5.3
Case C	Truncated cone-cylinder	52.6	356.4	329.9	7.4

2.1 弹丸入水前流场图像

图 5 给出了 3 种弹丸入水前的阴影照片。阴影成像反映密度的二阶导数,气、水密度相差约 1000 倍,因此,气/水界面在图 5 中显示为较宽的黑色水平线。图 5(a)中,弹丸未进入观察窗,BOPP 膜片破裂后,尾部气流膨胀产生的冲击波已越过弹丸头部进入观察窗。这也间接表明,弹托捕捉器侧向泄气孔不能全部泄放弹丸尾部的高温高压气体。图 5(b)表明,激波比弹丸先到达气/水界面,且激波在气/水界面发生规则反射,反射点沿气/水界面向左传播,此时未观察到气/水界面受明显扰动或水中透射冲击波的传播。其原因是:(1) 和空气相比,水和弹丸密度大,惯性也大,因此,当激波在空气/水界面反射时,未观察到气/水界面受扰动或发生变形,气/水界面和固壁类似;(2) 空气和水的声阻抗相差大,水吸收的空气冲击波能量小,水中透射激波强度非常弱,阴影图像无法显示。对 Case B 和 Case C 两种情况,气/水界面的反射冲击波已和高速运动弹丸接触,而弹丸未出现翻转等现象,故可忽略空气冲击波对弹丸近水面侵彻和弹丸运动的影响。从图 5(b)和图 5(c)看出:Case B 和 Case C 中气/水界面的反射冲击波和弹丸相互作用;Case A、Case B 和 Case C 弹丸头部均出现正激波或 λ 激波,结合表 1 的弹丸速度值可判断,弹丸做跨声速飞行。要说明的是:此时弹丸飞行区域位于上游激波波后,当地气流声速已增大,不是未扰空气声速。相对于地面坐标系或空气,弹丸仍做超声速飞行。主要原因是:在 Case A 和

Case B 中,弹丸位于气/水界面入射冲击波后气流中,Case C 弹丸位于气/水界面反射冲击波后,当地气体声速不同,导致弹丸飞行 Mach 数也不相同。根据图 5(b)和图 5(c),观察窗直径为 175 mm,照片间隔时间为 $156.25 \mu\text{s}$,3 种外形的弹丸在空气中的位移分别为 54.77、56.55 和 55.68 mm,估算得到弹丸入水前平均速度分别约为 350.5、361.9 和 356.4 m/s。

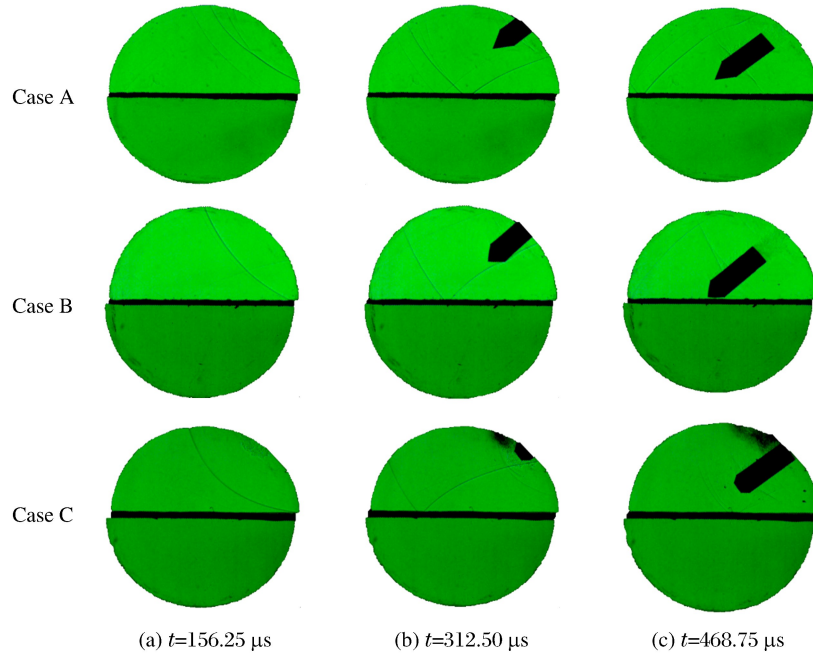


图 5 弹丸入水前流场高速阴影照片

Fig. 5 High-speed shadowgraphs of flow-field before projectile water entry

2.2 弹丸入水后流场图像

图 6 给出了弹丸入水后的流场阴影照片。刚入水时,弹丸高速侵彻水产生“半球形”冲击波系,但该“半球形”冲击波系并不同心,应该来自弹丸头部和身部多个部位与水的冲击。水中冲击波的传播表明此时水具有弱压缩性,弹丸承受相当大的冲击载荷。同时,弹丸侵彻气/水界面还在空气中产生冲击波,Case B 和 Case C 最为明显。原因是:弹丸冲击导致部分气/水界面破碎,形成“碎片云”(由空气和水滴或水块组成的水雾区,和固体冲击的破片云类似)，“碎片云”和弹丸逆向高速飞散产生空气冲击波。Case C 中能看到冲向气/水界面的弹丸尾迹气流和 BOPP 膜或弹托碎片(图 6 中 Case C 右侧黑块)。图 6 中黑色区域为水中气泡和空中“碎片云”形成的气-水两相区。其中,水下气泡体积远大于弹丸体积,“碎片云”在弹丸轴线两侧分布不对称,位于弹丸空中轨迹与水面夹角较大(钝角)的一侧,气泡和“碎片云”的边界均呈不规则形状且无明显界限。这表明弹丸头部产生了自然空化区。空气中黑色区域为弹丸冲击气/水界面产生的“碎片云”射流。黑色区域对应的密度梯度较大,如气/水界面和气泡边界;同时,气泡、液块和液滴群的光散射或折射导致平行光束无法通过,对应的阴影照片也呈黑色区域。水声速大于空气声速,图 6(b)~图 6(d)中已看不到水冲击波,“半球形”冲击波强度随半径的增大而不断下降,弹丸在水中做亚声速航行。图 6 中的零星波系可能是水冲击波在实验舱内壁面反射产生的。随着时间的增加,图 6 中黑色区域面积继续增大,即弹丸空泡或空化区体积随时间增大,空气中的“碎片云”扩散范围也随时间增大,并明显偏向左侧,特别是截锥柱弹丸情形(Case C)。因为气炮发射管出口距离气/水界面较近,当时间较长时,弹丸下游的残余气体射流(弹丸尾流)会影响到空气中的黑色区域。弹丸在水下运动速度降低,空泡膨胀也相对缓慢。限于观察窗尺寸,不能观察到弹丸全部水下弹道。根据图 6(a)和图 6(b),观察窗内径为 175 mm,相邻照片时间间隔是 $156.25 \mu\text{s}$,弹丸(含气泡)在水中位移分别为 51.81、53.64 和 51.40 mm,估算得到 3 种弹丸侵彻水后的平均速度分别为

331.6、342.3 和 329.9 m/s。和图 5 相比,较 3 种弹丸入水前的速度 350.5、361.9 和 356.4 m/s,入水后速度分别下降 5.4%、5.3%和 7.4%。

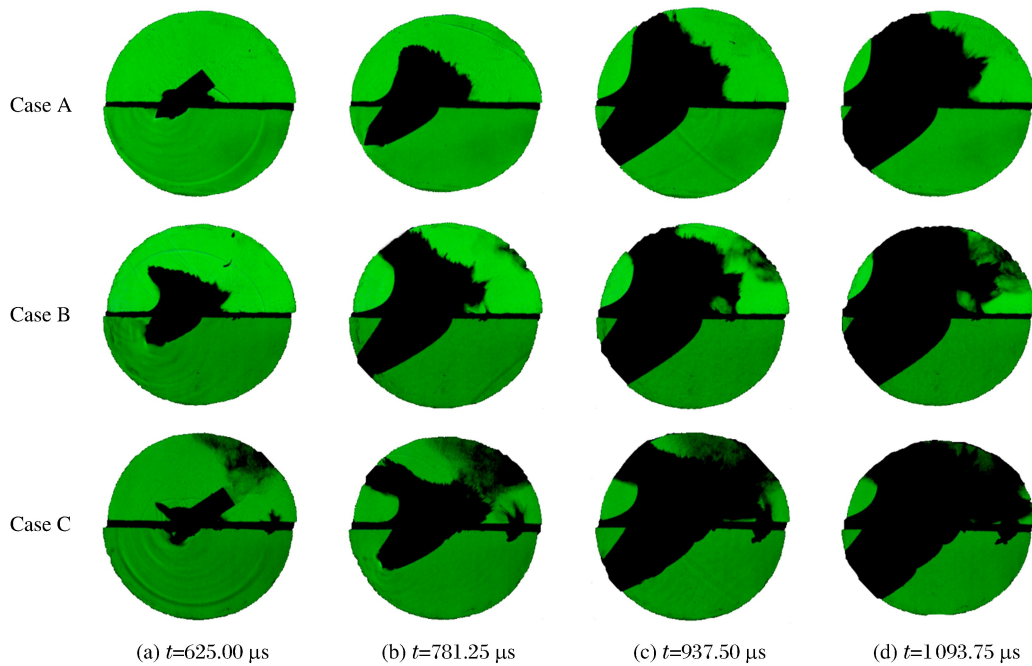


图 6 弹丸入水后流场阴影照片

Fig. 6 High-speed shadowgraphs of flow-field after projectile water entry

为了比较弹丸不同速度的影响,利用光电法(基于激光光束在弹丸表面发生光反射)测量弹丸速度,光电二极管(GT101)上升沿时间小于 $10 \mu\text{s}$,可保证千米每秒量级的速度测量精度。在阴影光路(见图 3)的凹球反射镜 II 焦点处加上刀口,得到速度 1.8 km/s、质量 40 g 的铝弹丸入水前、后的纹影照片,如图 7 所示。图 7(a)清楚地显示了锥柱弹丸斜入水(45°)前在空气中的头激波和羽流激波。图 7(b)和图 7(c)给出了弹丸入水后的水冲击波系、弹丸头部和羽流冲击波在气/水界面上的反射激波系。弹丸冲击产生的水激波也为复杂的多道“半球形”冲击波系。空中的羽流激波系随后在气/水界面不断反射,但未引起气/水界面剧烈振荡。和图 6 类似,图 7 也在空气中产生单侧气/水界面“碎片云”和水下空化区光折射的黑色区域。由于弹丸尺寸和质量减小,因此,图 7“碎片云”飞散区域大于水下空化区,空中“碎片云”和水下空化区尺寸都明显减小,体现了弹丸的尺度效应导致的唯象差别。

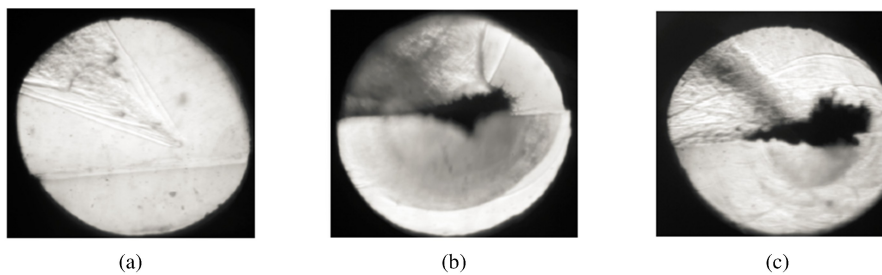


图 7 弹丸入水前、后的纹影照片

Fig. 7 Schlieren photographs before and after projectile water entry

3 结 论

(1) 立式可变发射角二级轻气炮发射弹丸的质量和速度变化范围较宽,适合研究高速到超高速弹

丸斜入水现象。采用纹影/阴影流场显示代替高速摄影,可以观察到流场激波结构。

(2) 对质量较大和速度较低的弹丸,破膜后弹丸尾迹的空气传播速度快于弹丸,在弹丸头部出现冲击波,并先于弹丸在气/水界面发生规则反射,但气/水界面未受明显扰动。弹丸入水后,产生“半球形”水冲击波系,气/水界面发生大变形和破碎,出现的“碎片云”位于弹丸入射轨迹和气/水界面交线夹角较大(钝角)一侧,水下出现空泡区,二者呈不规则形状且无明显界限。随着时间增加,二者体积不断增大,但增长速率变慢。

(3) 入水空泡头部形状和低速大质量弹丸头部构型有关,影响着空泡对称性和水下弹道稳定性。

(4) 小质量、超高速弹丸入水现象和低速、大质量弹丸类似,但水中空泡区域远小于气/水界面“碎片云”,尺度和速度效应的定量影响需做深入研究。

下一步将增加水箱体积和观察窗尺寸,结合片激光 Mie 散射,观察更大范围的入水弹道和气泡边界。

参考文献:

- [1] SCOLAN Y M, KOROBIKIN A A. Three-dimensional theory of water impact. Part 1. inverse Wagner problem [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2001, 440: 293-326.
- [2] KOROBIKIN A A, SCOLAN Y M. Three-dimensional theory of water impact. Part 2. linearized Wagner problem [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 549: 343-373.
- [3] HOWISON S D, OCKENDON J R, OLIVER J M. Deep-and shallow-water slamming at small and zero deadrise angles [J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 2002, 42(3/4): 373-388.
- [4] HOWISON S D, OCKENDON J R, WILSON S K. Incompressible water-entry problems at small deadrise angles [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, 222: 215-230.
- [5] CHARTERS A C. The aerodynamic performance of small spheres from subsonic to high supersonic velocities [J]. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 1945, 12(4): 468-476.
- [6] MAY A, HOOVER W R. A study of the water-entry cavity: AD 611406 [R]. 1963.
- [7] MAY A. The cavity after vertical water entry: AD 679905 [R]. 1968.
- [8] CUI S, CHEONG H K, HAO H. Experimental study of dynamic post-buckling characteristics of columns under fluid-solid slamming [J]. *Engineering Structures*, 2000, 22(6): 647-656.
- [9] HAO H, CHEONG H K, CUI S. Analysis of imperfect column buckling under intermediate velocity impact [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2000, 37(38): 5297-5313.
- [10] SHI H H, TAKAMI T. Hydrodynamic behavior of an underwater moving body after water entry [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2001, 17(1): 35-44.
- [11] TRUSCOTT T T, TECHET A H. A spin on cavity formation during water entry of hydrophobic and hydrophilic spheres [J]. *Physics of Fluids*, 2009, 21(12): 1-4.
- [12] TRUSCOTT T T. Cavity dynamics of water entry for spheres and ballistic projectiles [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2009.
- [13] GRUMSTRUP T, KELLER B J, BELMONTE A. Cavity ripples observed during the impact of solid objects into liquid [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(11): 1-41.
- [14] 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 W, GUO Z T, XIAO X K, et al. Experimental investigations on behaviors of projectile high-speed water entry [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(6): 579-584.
- [15] GUO Z T, ZHANG W, 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(2): 43-60.
- [16] YAO E R, WANG H R, PAN L, et al. Vertical water-entry of bullet-shaped projectiles [J]. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 2014, 2: 323-334.
- [17] TRUSCOTT T T, EPPS B P, BELDEN J. Water entry of projectiles [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2014,

46:355-378.

- [18] 黄彪,王国玉,权晓波,等. 绕平头回转体非定常空化流体动力特性研究 [J]. 实验流体力学, 2011, 25(2): 22-28.
HUANG B, WANG G Y, QUAN X B, et al. Study on the unsteady cavitating flow dynamic characteristics around a O-caliber ogive revolution body [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011, 25(2): 22-28.
- [19] 罗小鹏. 高速弹丸斜侵彻水现象的初步实验研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
LUO X P. Experimental studies on inclined impacting water of a hypervelocity projectile [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
- [20] 左金东. 高超声速弹丸和水斜侵彻的初步实验研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.

Water Entry Flow-Field Visualization of the Oblique Penetration of a High-Speed Projectile

ZHOU Jie, XU Shengli, PENG Jie

(School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: To study the air/water interface deformation and breakup, the water bubble and the blast waves in water, we launched a high-speed projectile using a vertical second-stage gas gun, and visualized the flow-field close to the air/water interface using the laser shadow and schlieren photography. The images show that the high pressure air downstream the projectile overtakes the projectile at the speed of about 350 m/s and generates blast waves in the air. In the meantime, the blast waves and cavitation bubbles are also generated in the water. The air blast wave reflects on the air/water interface but cannot deform it due to water's large inertia at such a short time. The projectile traveling is not disturbed although the reflected blast wave interacts with it. The droplets cloud from the broken interface is produced after the projectile water entry. It is hard to distinguish the border between the bubbles and the droplets clouds. For projectiles with different head shapes, the bubbles are obtained in different shapes and sizes but the projectile trajectory is seldom disturbed. Similar flow-field characteristics can be identified for a projectile at the speed of 1.8 km/s but with different size and shape of clouds and bubbles. The results demonstrate that such a vertical two-stage gas gun can provide a way for experiments of projectile water entry.

Keywords: two-stage gas gun; high-speed water entry; air-water interface; cavitation bubbles; blast waves