

高压物理学报

枪弹间隙对水下枪内弹道的影响

孟祥宇 侯健 秦一平 廖斐 鲁春佳

Influence of Interior Ballistics for Underwater Guns with Gun-Bullet Coupling Gap

MENG Xiangyu, HOU Jian, QIN Yiping, LIAO Fei, LU Chunjia

引用本文:

孟祥宇, 侯健, 秦一平, 等. 枪弹间隙对水下枪内弹道的影响[J]. 高压物理学报, 2020, 34(3):035101. DOI: 10.11858/gywlb.20190805

MENG Xiangyu, HOU Jian, QIN Yiping, et al. Influence of Interior Ballistics for Underwater Guns with Gun-Bullet Coupling Gap[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(3):035101. DOI: 10.11858/gywlb.20190805

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190805>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低侵彻枪弹在明胶内的弹道特性

Ballistic Characteristics of Low Penetration Bullet in Gelatin

高压物理学报. 2019, 33(2): 025103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170635>

超空泡射弹水下侵彻靶板三相耦合数值模拟

Three-Phase Coupling Numerical Simulation of Underwater Penetration of Supercavitating Projectile into Target Plate

高压物理学报. 2020, 34(1): 015103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190798>

金属隔层和空气间隙对钝感炸药冲击起爆的影响

Effects of Metal Interlayer and Air Gap on the Shock Initiation of Insensitive Explosives

高压物理学报. 2020, 34(3): 033401 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190816>

装配垫层与间隙对爆轰加载下金属飞片运动特征的影响

Effects of Explosive Device with Foam Cushion and Air Clearance on Kinetic Characteristic of Steel Flyer under Detonation Loading

高压物理学报. 2018, 32(4): 044202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170576>

有机玻璃-空气层结构对爆炸水池水下爆炸地基振动的影响

Influence of Plexiglass-Air Interlayer Structure on Foundation Vibration of Small Pool Underwater Explosion

高压物理学报. 2018, 32(2): 024201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170611>

转弯结构对其前方直巷内气体爆炸冲击波的影响

Influence of Bend Structure on Air Shockwave Generated from Gas Explosion in the Straight Tunnel before the Bend

高压物理学报. 2017, 31(4): 409 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.04.009>

枪弹间隙对水下枪内弹道的影响

孟祥宇, 侯 健, 秦一平, 廖 斐, 鲁春佳

(海军工程大学, 湖北 武汉 430000)

摘要: 为了研究枪炮全水下发射过程中枪弹耦合间隙对内弹道特性的影响, 运用 AUTODYN 有限元仿真软件, 针对滑膛水下枪枪弹耦合设置 0.1 mm 间隙与不设置间隙两种情况的内弹道过程进行了数值模拟; 采用 21、25 和 30 g 装药量对水下枪全水下带间隙发射内弹道过程进行了仿真分析, 获得了膛压、射弹速度以及过间隙燃气射流在内弹道过程中组分、压力与速度的分布规律; 并设计了实弹射击实验用于验证仿真结果。仿真和实验结果表明, 合适的枪炮耦合间隙能够有效地提高水下枪发射性能。当枪弹耦合设置 0.1 mm 间隙时, 采用 3 种装药量发射均能产生弹前气幕, 内弹道过程膛压下降明显, 弹丸炮口速度提升较为显著, 有利于产生稳定的超空泡包裹弹体, 使其在水下运动时所受阻力大大降低, 从而增加射弹水下行程。

关键词: 水下枪; 超空泡; 枪弹耦合间隙; 内弹道; 气液两相流

中图分类号: O389; TJ302

文献标识码: A

现阶段, 水下枪炮发射主要采用密封式或全水下式发射^[1-3], 这两种发射方式均存在一定的局限性。由于水下射弹受到水动压力的影响, 膛内运动时受阻力较大, 采用全水下式发射时存在过量弹前载荷导致膛压较高的问题, 为了保证枪管的安全性, 往往减少装药, 造成射弹初速较低。而采用密封式发射能够保证良好的密封性能, 防止大量海水进入枪管, 减小弹前载荷, 降低弹头在内弹道期间的运动阻力, 保证发射安全性和初速, 但该发射方式在射击中断后会产生液体回流现象, 需要排出身管内的海水, 再次密封炮口, 结构复杂且射速较慢。为了提高射速, 克服全水下发射的高膛压缺陷, 在全水下发射的基础上, 通过优化枪弹间隙配合, 使部分火药燃气通过间隙, 生成气幕推动弹前水柱加速排出炮口, 从而消除附加质量对超空泡射弹发射的影响, 有效地减小膛压, 提升射弹初速度。

水下气幕由多股燃气射流汇聚生成, 有关气体射流与水相互作用的问题, 相关学者进行了较多研究。Hoefele 等^[4]用高速摄影和压力测量的方法研究了气体分别通过直线型和扩张型风嘴喷入液体时的流场。Mori 等^[5]优化了风嘴运行的工作条件, 发现随着射流速度的增加, 气泡敲击频率降低, 可以实现泡状流向射流的转变。施红辉等^[6]对超音速射流胀鼓和回击特性进行了试验研究, 结果表明胀鼓频率越高, 回击频率越高。薛晓春等^[7-10]以整装式液体发射药(BLPG)火炮多点点火为背景, 针对渐扩型圆柱观察室开展了双束及四束燃气射流与液体工质相互作用的数值仿真与实验研究。Weiland 等^[11]研究了圆形射流入水过程中气液边界动力学特性与气液作用稳定性的关系。陈启林^[12]针对水下燃气射流流动过程、压力特性和噪声特性进行了研究, 并利用 FW-H 噪声预报模型对水下超声速燃气射流的噪声进行了模拟计算。汤龙生等^[13]针对水下超声速燃气射流气泡的生长及压力波传播特性进行了实验研究, 结果表明燃气泡生长和“破碎”伴随着压力脉动在水介质中传播, 气泡压力波的能量在水介质中快速衰减。

目前, 对气体射流与水相互作用的研究主要侧重于流场特性及射流汇聚过程, 国内外有关水下气幕式发射的研究也主要集中在导弹水下发射领域, 通过实验研究与数值分析, 获得导弹水下气幕式发

* 收稿日期: 2019-07-04; 修回日期: 2019-07-30

作者简介: 孟祥宇(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事兵器发射与动力推进技术研究。

E-mail: 1572981686@qq.com

射过程的流场特性。针对枪炮在全水下环境利用气幕优化发射过程的研究较少。南京理工大学周良梁等^[14-15]设计了相关实验,建立了多股燃气射流在充液圆管中扩展的三维非稳态数理模型,研究了枪炮水下气幕式发射过程中喷射结构和喷头运动对气幕特性的影响。赵嘉俊等^[16-18]分析了锥形分布的多股燃气射流在柱形充液室内的扩展特性,得到了不同结构及喷射压力情况下射流形成的 Taylor 空腔和流场内回流区的演化特征。

本研究基于水下枪全水下发射机理,针对枪弹间隙配合技术特点,探讨过间隙气体生成的气幕对水下枪全水下发射内弹道的影响,运用 AUTODYN 有限元软件对有无间隙和不同装药量条件下的内弹道过程进行数值仿真,设计水下实弹射击实验,采用实验和数值仿真相结合的方法对比分析气幕的生成对射弹在内弹道过程运动的优化作用,以及不同装药量对水下枪发射内弹道特性的影响。

1 水下枪带间隙发射物理模型及状态方程

1.1 物理模型

水下枪完全浸于水中,发射射弹时利用枪弹配合的间隙使弹后空间的部分燃气以射流的方式在枪管内形成气幕,从而达到协同排水的目的。通过将发射环境由液体变为低压气体,能够减少弹丸在膛内前进过程中水对其产生的阻力,可避免现有发射方式的不足。发射过程如图1所示,其中: l_g 为弹丸全行程, l_d 为弹丸长度, l 为弹丸在膛内运动位移, l_y 为过间隙气体流出量等效长度。

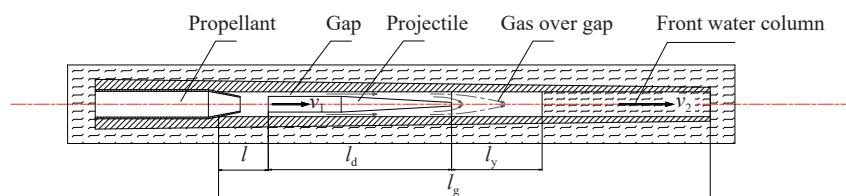


图1 水下枪枪弹耦合带间隙发射物理模型

Fig. 1 Physical model of underwater gun-bomb coupling gap launch

1.2 基本假设

高温高压燃气过间隙流动及其射流在膛内液体中扩展的过程非常复杂。在不失其流场基本特征的情况下,针对燃气射流扩展过程作如下简化^[14-18]:

- (1) 燃气射流过间隙后不再发生化学反应且组分保持不变;
- (2) 考虑到高温燃气与液体介质作用时间短暂,忽略液体汽化影响;
- (3) 间隙控制在 0.1 mm 以内,不考虑弹丸振动的影响。

1.3 状态方程

1.3.1 发射药状态方程

发射药燃烧与爆轰有本质差别。随着燃烧的进行,燃烧室内的气体压力不断增加,燃烧速度也不断增大,与炸药基本具有稳定爆速截然不同,因此在使用 AUTODYN 模拟火药燃烧时使用 JWL 状态方程并不能符合实际。本研究采用 Powder Burn 模型(慢燃烧模型)对发射药燃烧进行仿真。在确定慢燃烧模型的材料数据时,对慢燃烧数学模型的清晰认识具有重要意义。

慢燃烧模型由固体状态方程、反应比方程和反应产物的气体状态方程组成。通过发射药质量 m_s 随时间 t 的变化可以得到反应比方程

$$W(t) = \frac{m_s(t_0) - m_s(t)}{m_s(t_0)} \quad (1)$$

反应产物的气体状态方程(EOS)使用指数状态方程

$$p_g = \rho_g e_g e^{p_g/D} \quad (2)$$

式中: ρ_g 为气体密度, e_g 为气体质量内能, D 为常数, p_g 为反应产物气体压力。

指数状态方程得出了反应产物气体压力 p_g , 将气体压力带入 Vieille 定律公式可以得到固体的燃烧速率

$$\dot{b}(p_g) = ap_g^n + C \quad (3)$$

式中: b 为固体的燃烧速率, a 、 n 、 C 为常数。

通过反应比 W 、固体燃烧速率 b 和几何形状参数可以确定反应速率公式

$$\dot{F} = G(1 - \alpha W)^c \dot{b} \quad (4)$$

式中: G 为生长参数, α 为反应比因子, c 为生长反应比指数。 G 、 α 和 c 由发射药形状确定。本研究使用的发射药为 5/7 石发射药, 该种药型为 7 孔柱形发射药, 参数列于表 1, 其中 ρ_{ref} 为参考密度, ρ_s 为发射药密度, T_{ref} 为参考温度, κ 为热导率。

表 1 发射药材料参数
Table 1 Material parameters of propellant

Reacted EOS					
G/mm^{-1}	c	$C_1/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	C_2	$D/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$e_g \cdot \rho_{\text{ref}}/(\text{GJ} \cdot \text{m}^{-3})$
52.17	0.5	500	0	1.003 3	1.88
Solid unreacted EOS				Strength: von Mises	
Bulk modulus/ GPa	T_{ref}/K	Specific heat/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$\kappa /$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Shear modulus/ GPa	Yield stress/ MPa
13.5	293	0	0	1.38	2
Strength: von Mises			Cut offs		
Maximum temperature/K	$\rho_{\text{ref}}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	Maximum expansion	Minimum density factor	Minimum sound speed/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Maximum sound speed/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1.01×10^{20}	1.86	0.01	1×10^{-4}	1×10^{-6}	1×10^4
Exponential					
p_g/kPa	$b/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\rho_s/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	γ		
1.00×10^{-5}	0.007 1	1×10^{-6}	1		
2.50×10^6	2.043 2	1	1		
5.00×10^6	3.869 2	2	1		
7.50×10^6	5.623 6	3	1		
1.00×10^7	7.332 9	4	1		
1.25×10^7	9.009 5	5	1		
1.50×10^7	10.660 6	6	1		
1.75×10^7	12.290 6	7	1		
2.00×10^7	13.902 9	8	1		
1.00×10^9	515.278 0	9	1		

1.3.2 水的状态方程

水的状态方程使用 Polynomial 状态方程, 其本质是 Mie-Grüneisen 高压状态方程, 不过是将冷压和冷能以及 Grüneisen 系数表示成多项式的形式。AUTODYN 程序中的 Polynomial 状态方程如下

$$p = \begin{cases} A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 e_m & \mu \geq 0 \\ T_1\mu + T_2\mu^2 + B_0\rho_0 e_m & \mu < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: e_m 是单位质量内能增量, μ 为压缩度 (代表水受拉或受压状态), A_1 、 A_2 、 A_3 、 T_1 、 T_2 为压强量纲常数, B_0 、 B_1 为无量纲常数。具体参数取值列于表 2。

表 2 AUTODYN 程序提供的水多项式状态方程参数

Table 2 The polymerization EOS parameters of water provided by the AUTODYN program

A_1/GPa	A_2/GPa	A_3/GPa	T_1/GPa	T_2/GPa	B_0	B_1
2.2	9.54	14.57	2.2	0	0.28	0.28

2 边界条件与计算模型

2.1 计算域

水下枪发射装置主要由水下发射自动机和枪管组成。在水下枪的内弹道仿真过程中, 枪体全部浸入水中, 身管内充满液体, 是燃气与液体相互作用的主要区域。此外, 还包括火药燃烧的药室区域以及枪口附近液体区域。由于不考虑弹丸在枪管内的振动, 选取 1/2 截面作为仿真的计算域, 如图 2 所示。

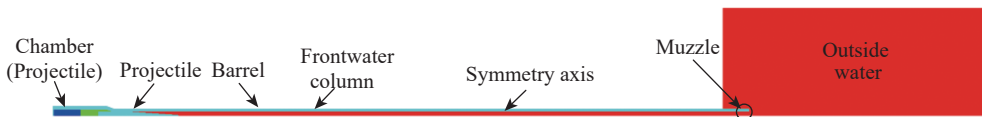


图 2 水下枪带间隙发射计算域

Fig. 2 Computational domain of underwater gap launch

2.2 网格划分与无关性验证

由于本研究不对弹丸、弹壳及枪管的变形进行分析, 因此将其设置为刚体, 使用 Lagrange 网格。两相流模型采用 Euler-Euler 算法求解, 因此火药燃气及水介质等流体区域采用 Euler 网格划分, 划分时将发射药与空气填充至水的 Euler 域中, 结构长度与实际尺寸相对应。膛口流场区域取长为 0.5 m、半径为 0.2 m 的圆柱形区域。

对膛口流场和弹丸运动轨迹区域进行不同尺寸的网格加密设置, 网格数分别为 64.9 万、44.9 万和 32.4 万。以 P 点为不同网格数计算的参考点, 得到该点膛内压力-时间对比曲线, 见图 3。可见, 与采用 64.9 万网格数计算压力相比, 使用 44.9 万网格数进行计算时压力的相对误差约为 2.3%, 采用 32.4 万网格数计算时压力的相对误差达到 8.2%。综合考虑计算效率和计算精度, 最终采用 44.9 万网格数进行仿真计算, 即膛口流场区域网格尺寸为 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$, 弹丸运动轨迹区域网格尺寸为 $0.25 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm}$, 网格划分见图 4。

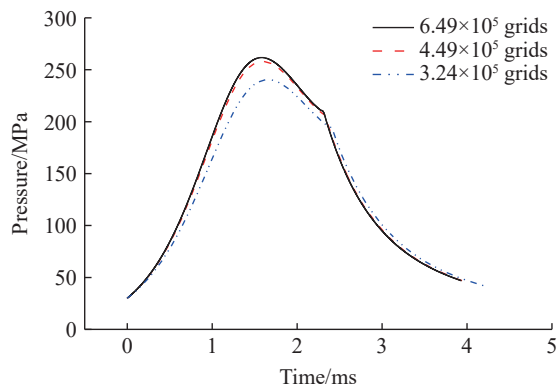


图 3 网格无关性验证

Fig. 3 Grid independence verification

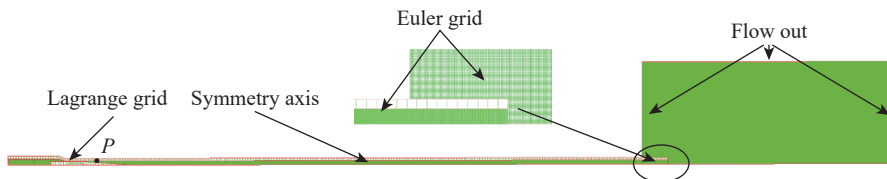


图 4 网格划分示意图

Fig. 4 Diagram of meshing

2.3 边界条件

枪管底部采用 Fixed Support 固定, 膛口流场水域外边界设置 Flow Out 边界, 模拟无限水域环境。药室为发射药的燃烧区域, 通过设置起爆点模拟底火引燃发射药的过程, 弹丸和身管中水介质受压由发射药燃烧输出得到。对弹丸运动设置压力阈值, 当压力大于 30 MPa 时弹丸开始运动。枪弹耦合存在间隙, 身管内液体与外界水域相通, 初始参数采用水深 1 m 处的环境参数, 即初始压力为 101 325 Pa, 初始温度为 300 K。

3 计算结果与分析

针对枪弹耦合无间隙与间隙值为 0.1 mm 的两种情况, 设置装药量为 25 g, 进行仿真分析, 发现两种情况的内弹道过程存在明显区别。根据组分分布图(图 5(a))可以发现, 水下枪枪弹耦合无间隙发射的整个内弹道过程均是弹体推动水柱运动, 未发现有气幕生成; 而设置 0.1 mm 间隙后, 在内弹道过程中出现膛内气幕(见图 5(b)), 2.5 ms 时气幕到达枪口, 起到了提前排出弹前水柱的作用。

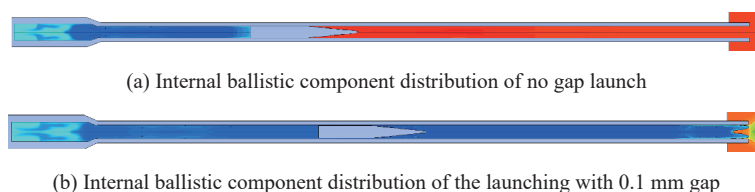


图 5 2.5 ms 时刻内弹道组分分布

Fig. 5 Internal ballistic component distribution at 2.5 ms

通过仿真还得到了内弹道过程中膛压与弹丸速度的变化规律。由图 6(a)可知, 当枪弹耦合间隙值为零时, 整个内弹道过程耗时 5.65 ms, 膛内压力在 2.1 ms 时达到最大, 为 368 MPa, 是间隙值为 0.1 mm 情况下最大膛压(271 MPa)的 1.35 倍。当射弹在膛内运动时, 若与水接触, 就会受到水动力压力阻力的影响, 该阻力与水的密度、射弹速度的平方和接触面积成正比, 因此当射弹速度越大时, 弹体受动压力阻力也越大, 这也是全水下射弹初速不高的重要原因。观察图 6(b)可发现, 在 4.15 ms 时弹丸受到水产生的动压力阻力超过了膛内压力, 射弹速度开始下降, 出枪口时速度下降为 347 m/s, 仅为间隙值为 0.1 mm 时弹丸炮口速度的 43.7%。对比有、无间隙两种情况的速度变化可以发现, 有间隙情况下射弹在 1.2 ms 后加速度明显大于无间隙情况, 原因是此时弹前气幕基本形成, 射弹受水动力压力阻力逐渐消失。根据仿真数据可以分析得出, 水下枪枪弹耦合带间隙发射能够明显提高射弹初速, 降低膛内压力, 能够对水下枪全水下发射起到一定增益作用。

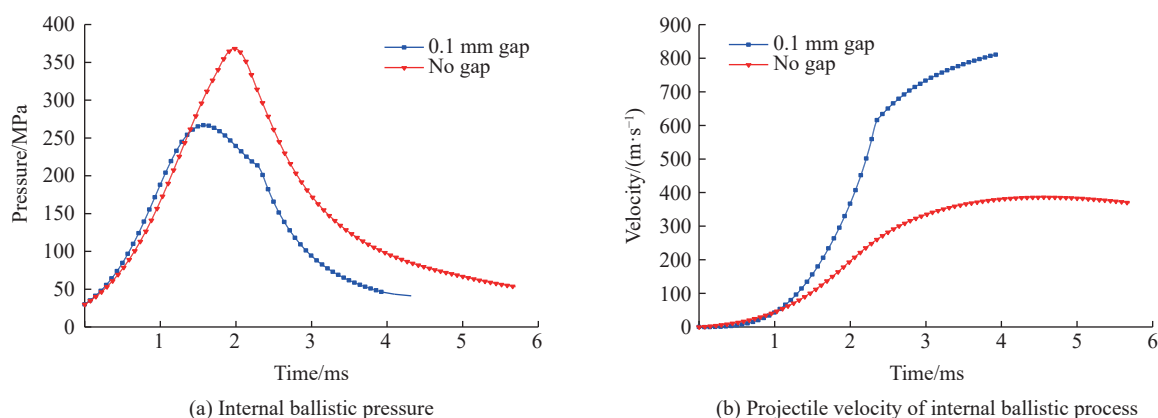


图 6 无间隙与间隙 0.1 mm 两种情况的内弹道参数变化曲线

Fig. 6 Variation curves of internal ballistic parameters of the launching with no gap and 0.1 mm gap

为验证在不同装药条件下,水下枪发射是否均能生成管内气幕,并探究装药量对水下枪发射内弹道过程的影响,分别对3种装药情况(21、25和30 g)进行了有限元仿真。

图7给出了3种装药量下经有限元仿真得到的内弹道膛压及弹丸速度随时间的变化曲线。可见,随着装药量的增加,膛内压力明显增高,装药量为30 g时最大膛压为421.3 MPa,是21 g装药工况的2.26倍;装药量分别为21、25、30 g时,燃气射流分别在1.6、1.2和0.8 ms基本形成气幕,导致射弹加速度升高。生成的气幕分别在2.67、2.32和1.85 ms推动弹前水柱排出枪口,导致膛压变化曲线与弹丸速度曲线均出现拐点,其中随着装药量的增加,燃气射流泄出速度升高,单位时间泄出流量增加,导致拐点后的膛压下降速度明显提高,射弹速度的增长率略有下降。

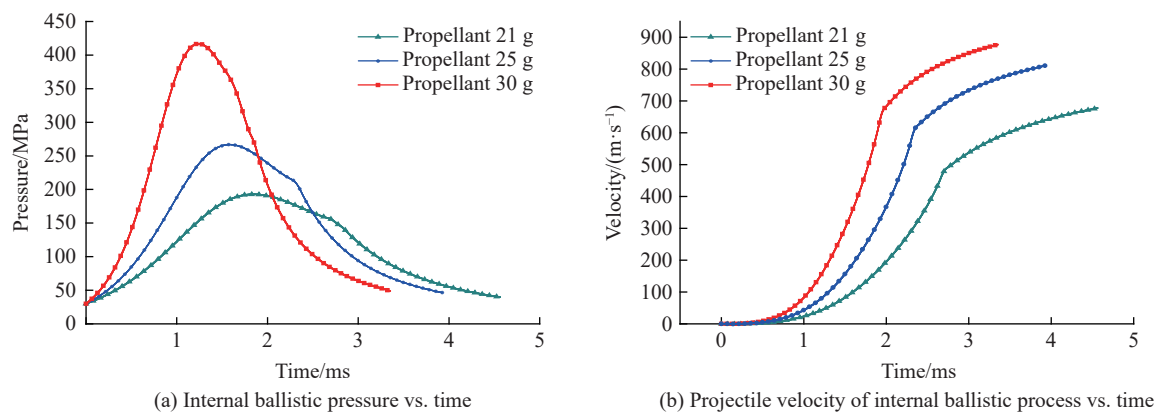


图7 不同装药情况下内弹道参数变化曲线

Fig. 7 Variation curves of internal ballistic parameters of the launching with different propellants

根据仿真结果,截取弹丸与燃气段组分分布情况,可以分析过间隙火药燃气射流在膛内的发展形成过程及压力、速度变化情况,图8~图10分别为装药量为25 g时膛内气液的组分分布、气液流速分布和压力云图。

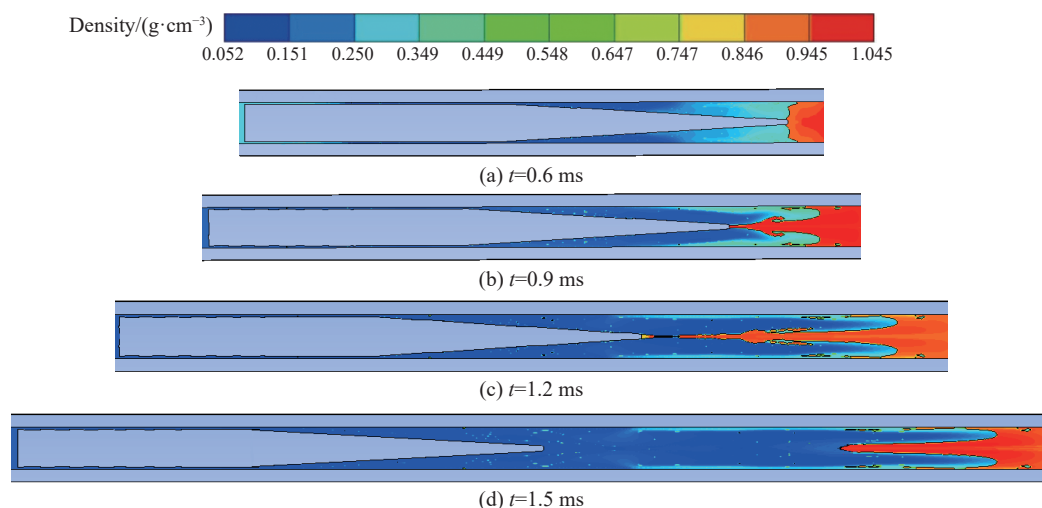


图8 膛内气液组分分布

Fig. 8 Distribution of gas and liquid components in the crucible

从图8中气幕扩展过程可以看出,在25 g装药的情况下,过间隙燃气在0.6 ms时运动至弹丸顶部,由于Taylor不稳定性作用,射流中心凹陷,出现分叉变形,部分射流贴壁运动。0.9 ms时随着分叉现象进一步加剧,由于气液截面处速度高、压强低,射流出现卷吸回流现象,形成小型旋涡状湍流,射流头

部两侧均有气核脱落。1.2 ms 时卷吸现象基本消失, 射流呈现为贴壁射流, 射流尚未汇聚成气幕。1.5 ms 时射流长度达到 1 倍弹丸长度, 原来的两段贴壁射流逐渐汇聚, 气幕基本形成。

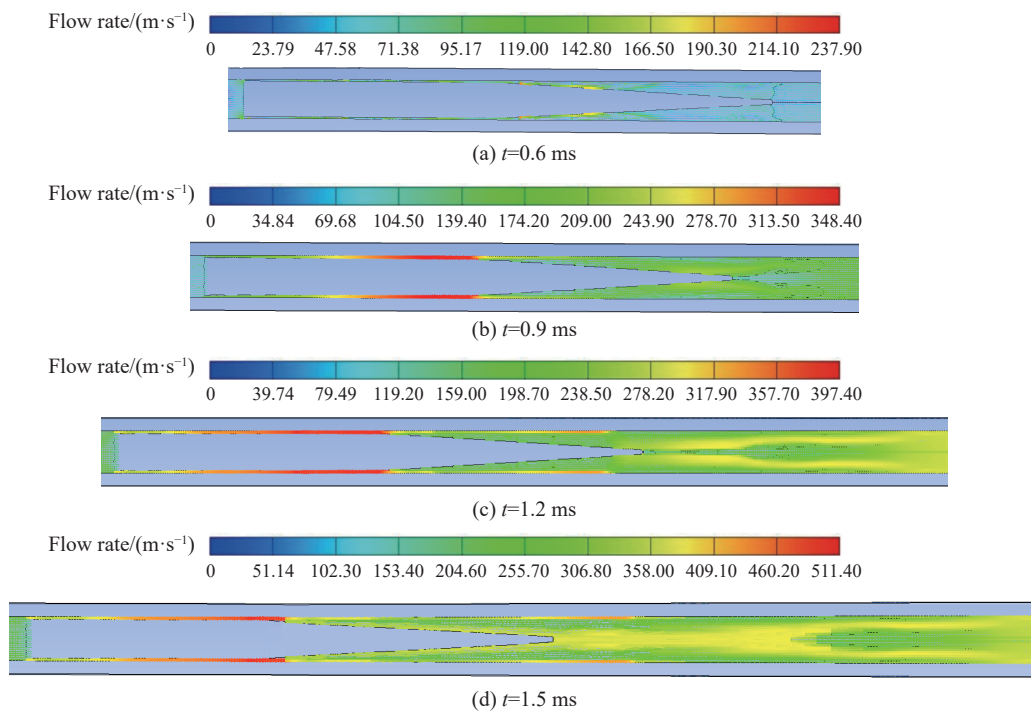


图 9 气液流速分布

Fig. 9 Gas-liquid flow rate distribution

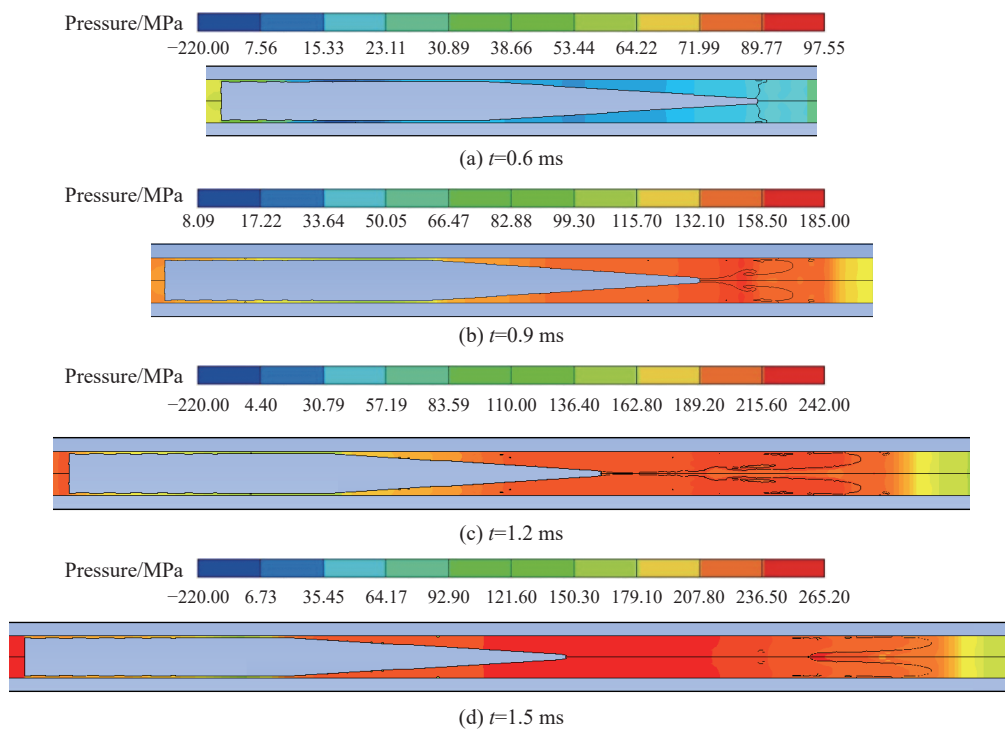


图 10 压力云图

Fig. 10 Pressure distribution

结合图9可以看出:当 $t = 0.6\text{ ms}$ 时,过间隙火药燃气在膛内发展过程中,高速运动区域主要集中在枪弹耦合间隙区域,并且在出间隙过程中速度下降梯度较大,这是由于高速气体进入间隙时流通截面半径骤缩,气体流动速度增加,并在出间隙时流通截面扩增,同时运动受到液体阻滞,导致射流速度下降迅速;在 $t = 0.9\text{ ms}$ 时,射流产生的Taylor空腔顶部出现回流,抑制了中心液体的轴向运动,出现中心低速区域;当 $t = 1.2\text{ ms}$ 时,随着燃气射流的轴向扩展,回流现象加剧,射流间低速区域轴向分布范围进一步增大;当 $t = 1.5\text{ ms}$ 时,随着过间隙燃气射流的汇聚,中心低速区域的液体被逐渐排出,气幕流速逐渐增大。

图10所示为燃气射流在膛内的压力演化过程。膛内燃气射流在发展过程中,高压区主要集中在燃气内部,通过图10可以分析得出火药燃气过间隙时压力变化的普遍规律:在燃气进入间隙时,流速增加,导致压力有所降低;出间隙时燃气流通截面逐渐扩大,流速降低,燃气压力略有升高;当到达弹丸顶部时燃气迅速膨胀,在膛内液体中形成Taylor空腔,压力沿程降低。观察燃气射流与液体交界面会发现,两相交汇处会出现局部高压区,这是由于射流Taylor空腔顶端受到液体的阻挡,射流顶部产生压缩,从而出现局部高压。

4 实验研究

为了验证数值仿真的正确性,需要设计相关的实弹射击实验来对内弹道特征参数进行观测。

4.1 实验装置

实验系统如图11和图12所示,主要由水下枪发射装置、水下靶道、高速摄像机和水下综合测试系统4部分组成,其中水下综合测试系统由膛压测试系统和水下射弹速度测试系统组成。水下枪发射

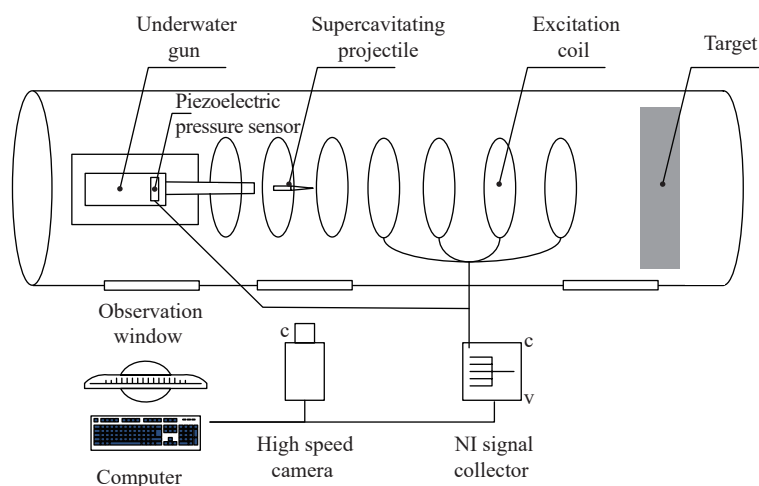


图11 实验系统示意图

Fig. 11 Schematic of experiment system

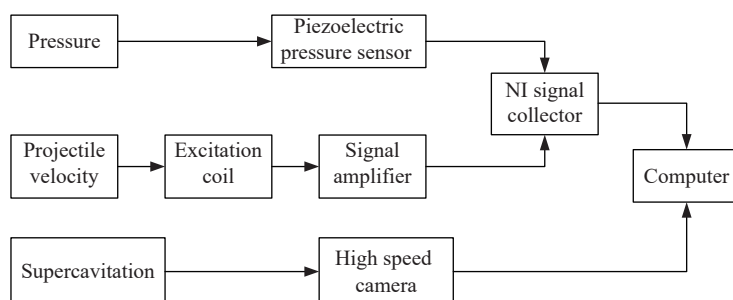


图12 测试系统框图

Fig. 12 Diagram of testing system

装置安装在水下靶道的工作平台上, 发射装置采用滑膛枪管, 枪管与弹丸配合间隙为 0.1 mm, 当弹丸离开药室后, 火药燃气可通过间隙与枪管中的液体相互作用。水下靶道内装满水介质, 模拟全水下发射环境, 测速线圈靶吊装于靶道中轴线上, 安装间隔为 1 m, 靶道侧面设有观察窗, 高速摄影设备通过观察窗拍摄膛口流场以及弹丸水下运动情况。

4.2 实验方法

在水下实弹射击实验中, 采用对照实验方法, 通过调整水下枪枪弹的配合间隙, 验证间隙的有无对水下枪发射内弹道特性的影响; 之后将间隙设置为 0.1 mm, 调整发射药的装药量分别为 21、25、30 g, 测试在枪弹耦合存在间隙的情况下发射药使用量对水下枪膛压及弹丸初速的影响。

速度测试原理如图 13 所示, 采用区截式测速工作原理^[19]: 在励磁线圈中加一恒定直流电流时, 励磁线圈会产生恒定磁场, 在铁磁性弹丸以速度 v 接近励磁线圈的过程中, 会被励磁线圈磁场磁化, 此时, 根据电磁学原理, 弹丸与感应线圈的关系可以用圆柱磁铁穿过感应线圈来等效。磁化弹丸切割感应线圈磁感线产生正弦电动势, 输出至采集设备中。

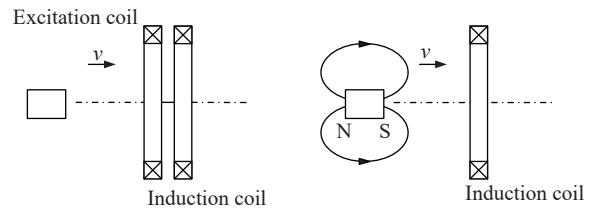


图 13 线圈靶测速原理

Fig. 13 Principle of magnetic velocity measurement

基于此原理, 弹丸在两个线圈靶之间的平均速度可以表示为

$$v = \Delta l / \Delta t \quad (6)$$

式中: Δl 为两个线圈靶之间的距离, Δt 为两个正弦信号过零点的时间差值。

本实验中, 前两枚线圈靶分别安置于炮口前方 0.5 m 和 1.5 m 处。根据文献 [20] 弹丸在水下形成超空泡后, 航行 1 m 的速度降近似呈线性变化, 因此该组线圈测得的平均速度可近似为炮口前 1 m 处的弹丸速度。

根据牛顿第二定理

$$m\dot{v} = \frac{1}{2}C_{wx}A\rho v_t^2 \quad (7)$$

式中: m 为射弹质量, A 为射弹截面积, C_{wx} 为等效阻力系数, v_t 为射弹余速。

对式 (7) 进行积分运算, 并变换可得到

$$v_t = \frac{1}{\frac{1}{v_0} - \frac{\rho AC_{wx}t}{2m}} \quad (8)$$

因此航程 s_t 为

$$s_t = \frac{2m}{\rho AC_{wx}} \ln \frac{v_t}{v_0} \quad (9)$$

式中: 射弹质量 m 、截面积 A 、时间 t 、航程 s_t 以及射弹余速 v_t 已知。联立式 (8) 和式 (9), 可以求解射弹枪口速度 v_0 和等效阻力系数 C_{wx} 。

4.3 实验结果

针对无间隙和间隙值为 0.1 mm 的两种情况, 采用 25 g 装药分别进行了两次实验, 得到了内弹道过程膛压曲线、测速系统测速情况以及弹丸出炮口后 1 m 处超空泡形成情况。图 14 显示了 4 次实验的膛压变化。当间隙为 0.1 mm 时, 两次实验

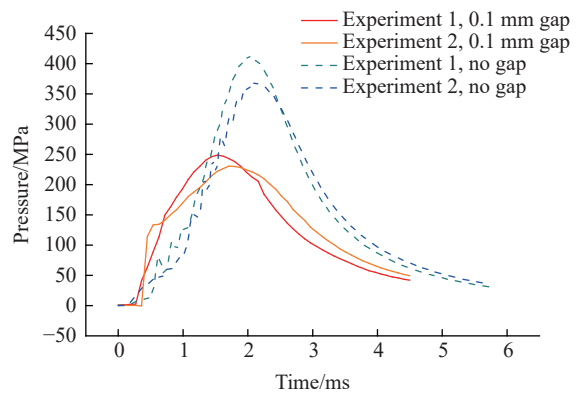


图 14 有、无间隙两种情况下膛压的测试曲线

Fig. 14 Pressure curve of the launching with no gap and 0.1 mm gap

的膛压均降低到 250 MPa 以下;而将间隙取消后,膛压分别升高了 46.2% 和 62.2%。

根据图 15 可知,当枪弹配合间隙为 0.1 mm 时,弹丸出膛后,枪口前 1 m 处的线圈靶测得两段正弦信号过零点的时刻分别为 1 199.160 ms 和 1 200.456 ms,计算得到该点弹丸存速还能达到 771.6 m/s,形成的超空泡质量良好。而间隙去除后,膛口前 1 m 处弹丸存速仅剩 149.36 m/s。观察空泡形成情况可知,由于枪口速度不足,弹丸出膛后未能生成良好的空泡,运动轨迹产生了翻转,阻力急剧增大,导致弹丸解体,弹丸在水中的运动速度锐减。

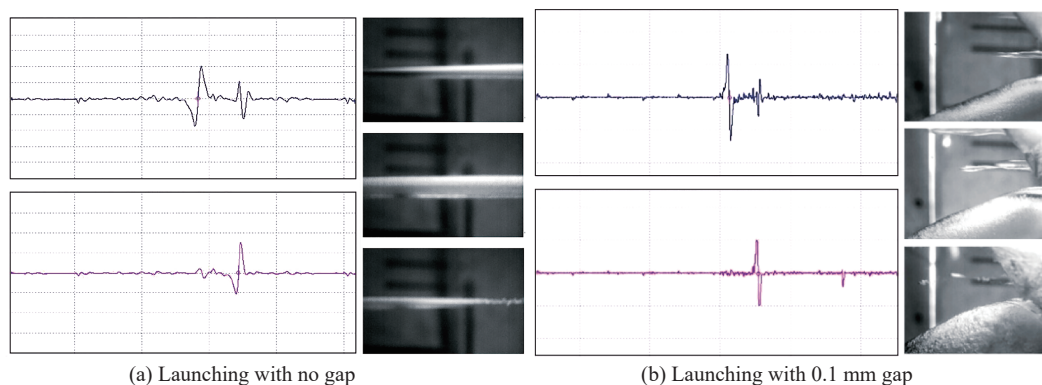


图 15 测速系统及高速摄影结果

Fig. 15 Results of speed measuring system and high speed camera

由实验可知,当枪弹耦合设置 0.1 mm 间隙后,内弹道过程中膛压下降明显,弹丸炮口速度显著提升,有利于产生稳定的超空泡包裹弹体,使其在水下运动时所受阻力大大降低,增加了射弹水下行程。

针对枪弹间隙为 0.1 mm 的滑膛水下枪进行了 3 种装药量的实弹射击实验,膛压测试系统记录了水下枪内弹道膛压随时间变化的曲线,如图 16 所示。可以发现,随着装药量的减少,膛压峰值明显降低,弹丸膛内运动时间增长,分别在 3.52、4.48 和 5.15 ms 射出枪口。当装药量为 25 g 时,根据实验时压电传感器测试位置,在仿真中设置探针,读取该处膛压的计算曲线,如图 17 所示。将实验与仿真结果进行比较可以看出,膛压曲线的整体变化趋势相近,在 2.3 ms 附近,两条膛压曲线均出现了较为明显的拐点,通过仿真可知该时刻燃气生成的气幕排出枪口,导致膛压的下降速度明显提高。实验的最大膛压出现于 1.73 ms,仿真的最大膛压出现于 1.89 ms,分别为 247.8 MPa 和 271.3 MPa,相对误差为 2.01%。由此说明本研究采用的数值模型对水下枪发射内弹道过程的数值分析是准确的。

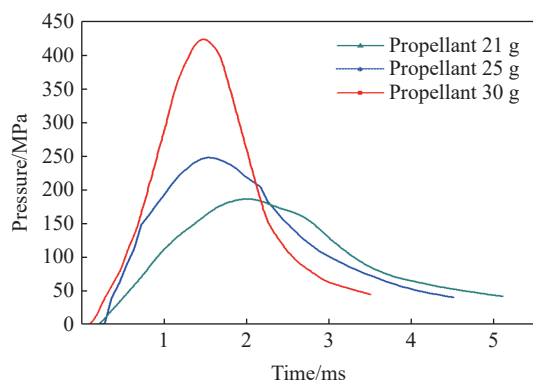


图 16 不同装药量条件下膛压测试曲线

Fig. 16 Pressure curve of different propellants

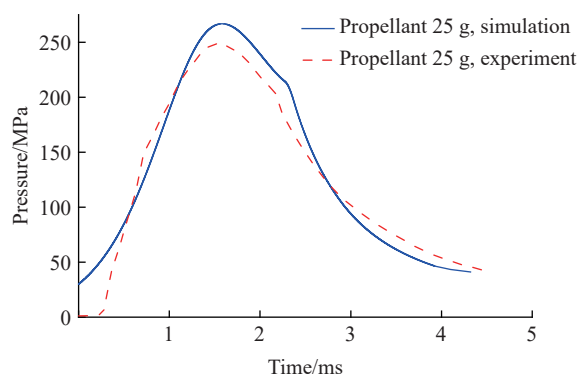


图 17 膛压仿真测试对比曲线

Fig. 17 Pressure comparison of simulation and experiment

实验记录水下枪发射内弹道特征参数如表 3 所示。3 种装药情况下,炮口速度随着装药量的增加而增加;装药 30 g 时,弹丸在炮口处速度达到 896.7 m/s,两次实验速度均值相比 21 g 装药提高了 33.1%。与有限元仿真得到的数值相比,相对误差均在 2.5% 以内。根据仿真结果,在 3 种装药情况下,

水下枪发射时火药燃气均能利用枪弹配合的间隙产生弹前气幕, 达到提前排水的目的, 有效增加了射弹枪口初速。

表 3 水下射弹实验与数值计算结果

Table 3 Experiment and numerical calculation results of underwater launch

Exp. No.	Experimental results					Simulation results	
	Maximum pressure/ MPa	Velocity before the muzzle (1 m)/(m·s ⁻¹)	Muzzle velocity/ (m·s ⁻¹)	Average pressure/ MPa	Average velocity/ (m·s ⁻¹)	Maximum pressure/ MPa	Muzzle velocity/ (m·s ⁻¹)
1	209.9	638.6	659.8	217.8	667.1	223.5	671.7
2	225.7	651.4	674.3				
1	253.6	771.5	796.1	250.7	799.9	271.3	814.2
2	247.8	778.2	803.7				
1	413.8	842.7	879.2	427.8	888.0	422.9	883.5
2	441.7	865.8	896.7				

5 结 论

以水下枪全水下带间隙发射方式的内弹道模型为基础, 针对间隙对内弹道特性的影响以及不同装药量下带间隙发射是否均能生成弹前气幕等问题进行了研究。通过对内弹道过程中膛压、射弹速度和枪管内气液组分变化规律的分析以及实弹射击实验的对比验证, 可得到以下结论。

(1) 相对于水下枪枪弹配合无间隙发射, 当枪弹耦合设置 0.1 mm 间隙后, 膛内气体和弹前水柱流动状态发生剧烈变化, 由经典的弹推水柱变为气体先将水柱推出, 从而卸载了大量弹前载荷, 消除了液体对弹丸产生的动压力阻力影响, 使弹丸炮口速度显著提升, 内弹道过程中膛压下降明显, 有利于产生稳定的超空泡包裹弹体, 使其在水下运动时所受阻力大大降低, 增加了射弹水下行程。

(2) 在弹前气幕形成初期, 由于 Taylor 不稳定性作用, 射流中心凹陷, 出现分叉变形, 随后出现卷吸回流现象, 随着回流逐渐消失, 燃气射流由贴壁射流汇聚成弹前气幕, 将发射环境由液体变为低压气体环境。过间隙火药燃气在膛内发展过程中, 高速运动区域主要集中在枪弹耦合间隙区域, 高压区域主要集中在燃气内部, 射流与液体交汇处会出现局部高压区。

(3) 在 3 种装药量情况下, 内弹道过程均能产生弹前气幕, 且随着装药量的增加, 弹前气幕的形成时间与气幕排出炮口的时间均提前, 膛内压力以及射弹枪口速度均明显增高。当装药量为 30 g 时, 最大膛压是 21 g 装药的 2.26 倍, 射弹枪口速度提升约 30%。3 种装药条件下, 燃气射流生成的气幕排出枪口, 导致膛压变化曲线与弹丸速度曲线均出现拐点, 且随着装药量的增加, 膛压下降速度明显提高, 射弹速度增长率略有下降。

(4) 枪弹配合间隙值对水下超空泡高速射弹武器内弹道特性有较为显著的影响, 间隙值的优化对水下射弹发射技术的进步有至关重要的作用。

参考文献:

[1] 魏平, 侯健, 杨柯. 超空泡射弹研究综述 [J]. 舰船电子工程, 2008(4): 13–17.
WEI P, HOU J, YANG K, et al. Summary of supercavitating projectile researches [J]. Ship Electronic Engineering, 2008(4): 13–17.

[2] 梅雄三. 某水下炮发射口密封特性的分析 [D]. 南京: 南京理工大学, 2017: 64–65.
MEI X S. Analysis of sealing characteristics of underwater gun muzzle [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017: 64–65.

- [3] 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: 32–43.
ZHANG X W. Motion simulation and ballistic characteristics analysis of underwater supercavitating projectile [D]. Taiyuan: North University of China, 2017: 32–43.
- [4] HOEFELE E O, BRIMACOMBE J K. Flow regimes in submerged gas injection [J]. *Metallurgical Transactions B (Process Metallurgy)*, 1979, 10(4): 631–648.
- [5] MORI K, OZAWA Y, SANO M. Characterization of gas jet behavior at a submerged orifice in liquid metal [J]. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 1982, 22: 377–384.
- [6] 施红辉, 郭强, 王超, 等. 水下超音速气体射流胀鼓和回击的关联性研究 [J]. *力学学报*, 2010, 42(6): 1206–1210.
SHI H H, GUO Q, WANG C, et al. Experiments on the relationship between bulging and back-attack of submerged supersonic gas jets [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2010, 42(6): 1206–1210.
- [7] 薛晓春, 余永刚, 张琦, 等. 渐扩边界形状对双股燃气射流扩展特性影响的实验研究 [J]. *弹道学报*, 2013, 25(2): 44–47, 64.
XUE X C, YU Y G, ZHANG Q, et al. Experimental study on effects of stepped-wall boundary on expansion characteristic of twin combustion-gas jets [J]. *Journal of Ballistics*, 2013, 25(2): 44–47, 64.
- [8] 薛晓春, 余永刚, 张琦. 双股燃气射流在充液室内扩展特性的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(5): 449–455.
XUE X C, YU Y G, ZHANG Q. Experimental study on expansion characteristics of twin combustion-gas jets in liquid-filled chambers [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(5): 449–455.
- [9] 薛晓春, 余永刚, 张琦, 等. 双束燃气射流与整装式液体装药相互作用的实验和数值模拟 [J]. *兵工学报*, 2013, 34(6): 669–677.
XUE X C, YU Y G, ZHANG Q, et al. Experiment and numerical simulation for interaction of twin gas jets and bulk-loaded liquid charge [J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(6): 669–677.
- [10] 冯博声, 薛晓春. 四股燃气射流在整装式液体中扩展特性的实验研究 [J]. *含能材料*, 2017, 25(12): 1004–1010.
FENG B S, XUE X C. Experimental study on expansion characteristics of four combustion gas jet in bulk-loaded liquid [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2017, 25(12): 1004–1010.
- [11] WEILAND C, VLACHOS P P. Round gas jets submerged in water [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2013, 48: 46–57.
- [12] 陈启林. 水下燃气射流数值仿真与试验研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016: 55–56.
CHEN Q L. The Numerical simulation and experimental research on underwater gas jet [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016: 55–56.
- [13] 汤龙生, 刘宇, 吴智锋, 等. 水下超声速燃气射流气泡的生长及压力波传播特性实验研究 [J]. *推进技术*, 2011, 32(3): 417–420.
TANG L S, LIU Y, WU Z F, et al. Experimental study on characteristics of bubble growth and pressure wave propagation by supersonic gas jets under water [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(3): 417–420.
- [14] 周良梁, 余永刚, 曹永杰. 喷射结构对充液圆管内气幕特性影响的数值分析 [J]. *含能材料*, 2016, 24(7): 657–663.
ZHOU L L, YU Y G, CAO Y J. Influence of injection structure on gas-curtain generation characteristics in liquid tube by numerical analysis [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2016, 24(7): 657–663.
- [15] 周良梁, 余永刚. 喷头运动对水下气幕生成特性影响的研究 [J]. *推进技术*, 2017(4): 239–245.
ZHOU L L, YU Y G. Study of sprayer movement influence on underwater gas-curtain generation characteristics [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017(4): 239–245.
- [16] 赵嘉俊, 余永刚. 侧喷孔分布对多股燃气射流在充液室中扩展特性的影响 [J]. *工程力学*, 2017(7): 247–254.
ZHAO J J, YU Y G. Effects of the distribution of lateral orifices on expansion of multiple combustion gas jets in water-filled chamber [J]. *Engineering Mechanics*, 2017(7): 247–254.
- [17] 赵嘉俊, 余永刚. 柱形充液室内多股燃气射流流场的气体与液体两相流场演化特性 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(10): 1852–1859.
ZHAO J J, YU Y G. The evolution of gas-liquid flow of multiple combustion gas jets in a cylindrical water-filled chamber [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(10): 1852–1859.
- [18] 赵嘉俊, 余永刚. 锥形多股火药燃气射流与液体工质相互作用的实验研究 [J]. *含能材料*, 2015, 23(11): 1055–1060.
ZHAO J J, YU Y G. Interaction between cone-shaped multiple combustion gas jets and liquid [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2015, 23(11): 1055–1060.

- [19] 秦会国, 马峰, 仲霄, 等. 水中弹药的电磁感应测速方法研究 [J]. 测试技术学报, 2012, 26(4): 281–287.
QIN H G, MA F, ZHONG X, et al. Velocity measurement method of underwater projectile based on electromagnetic induction [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2012, 26(4): 281–287.
- [20] 黄闯. 跨声速超空泡射弹的弹道特性研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2017: 117–126.
HUANG C. Research of trajectory characteristics of supersonic-supercavitating projectiles [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017: 117–126.

Influence of Interior Ballistics for Underwater Guns with Gun-Bullet Coupling Gap

MENG Xiangyu, HOU Jian, QIN Yiping, LIAO Fei, LU Chunjia

(*Naval University of Engineering, Wuhan 430000, Hubei, China*)

Abstract: In this paper, the influence of the gun-bullet coupling gap on the internal ballistic characteristics during the full underwater launch of the gun have been studied. The internal ballistic process of setting 0.1 mm gap and no gap is simulated by AUTODYN finite element simulation software. And the internal ballistic process of underwater gun with underwater clearance is simulated using 21, 25 and 30 g propellant. The projectile velocity, pressure inside the barrel and the distribution of components, pressure and velocity of over-gap gas jets during the internal ballistic process are obtained from the simulation, and the simulation results is verified by experiment. The simulation and experimental results show that the proper gun coupling gap can effectively improve the underwater gun launch performance. When the gun-bullet coupling gap is set as 0.1 mm, the gas curtain are all obtained from the propellant with three different masses. Meanwhile, the pressure decreased obviously during the internal ballistic process, and the projectile speed at muzzle is improved significantly, which is beneficial to the production of stable supercavitation warp projectile. The resistance of the projectile moving underwater reduces greatly and the travel of the projectile increases underwater.

Keywords: underwater gun; supercavitation; gun-bullet coupling gap; interior ballistics; gas-liquid two-phase flow