

专题——水中空化及弹道技术

水下枪炮发射问题研究综述

王雨舒, 吕续舰

(南京理工大学 能源与动力工程学院, 南京 210094)

摘要: 首先介绍了水下枪炮类武器发射问题的研究意义, 并对其军事需求进行了分析。之后对常见的水下枪炮发射方式进行了介绍, 并简述了各自的发展历程。总结了目前对水下发射问题内弹道的研究进展, 结合水下枪炮发射问题自身特点, 阐述了燃气射流的形成机理以及相关研究的发展过程, 比较性地总结了空气中枪炮发射膛口流场与水下枪炮发射膛口流场的研究进展及对应典型波系结构。最后, 对水下枪炮发射领域仍存在的科学问题以及未来发展趋势作出了展望。

关键词: 水下枪炮; 武器发射; 多相流; 内弹道; 燃气射流; 膛口流场

中图分类号: TJ67 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)05-0001-13

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.05.001

Review on Underwater Gun Launching Problems

WANG Yu-shu, LYU Xu-jian

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

ABSTRACT: Firstly, this paper introduces the research significance of underwater gun weapon launches and the military needs are analyzed. Then, the commonly used launch methods of underwater guns are introduced, and their respective development processes are briefly described. The research progress on the interior ballistics of underwater launches is summarized. Combined with the characteristics of underwater gun firing problem, the formation mechanism of gas jet and the evolution process of related research are expounded. The research progress and corresponding typical wave system structure of the flow field at the muzzle of air gun and underwater gun are summarized comparatively. Finally, the scientific problems existing in the field of underwater gun firing and the future development trend are prospected.

KEY WORDS: underwater gun; weapon launch; multiphase flow; interior ballistics; gas jet; flow field of muzzle

水下武器的发射动力学与流场特性的研究, 在工程和军事上皆具有相当大的研究价值和应用前景。其中对于水下枪炮发射问题的研究, 现阶段仍属于该领

域的研究热点。水下枪炮类武器作为从传统枪炮拓展而来的新型兵器, 常装备于蛙人小分队等海军特种部队^[1], 这使得水下枪炮类武器的研究对于海洋作战而

收稿日期: 2022-03-15; 修订日期: 2022-03-29

Received: 2022-03-15; Revised: 2022-03-29

基金项目: 水下信息与控制重点实验室开放研究项目(2021-JCJQ-LB-030-05); 重点实验室基金(6142604190302)

Fund: Science and Technology on Underwater Information and Control Laboratory (2021-JCJQ-LB-030-05); Fund of Key Laboratory (6142604190302)

作者简介: 王雨舒(1996—), 男, 硕士, 主要研究方向为水下发射流体动力学。

Biography: WANG Yu-shu (1996-), Male, Master, Research focus: hydrodynamics of underwater launch.

通讯作者: 吕续舰(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为流体力学。

Corresponding author: LYU Xu-jian (1984-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: fluid mechanics.

引文格式: 王雨舒, 吕续舰. 水下枪炮发射问题研究综述[J]. 装备环境工程, 2022, 19(5): 001-013.

WANG Yu-shu, LYU Xu-jian. Review on Underwater Gun Launching Problems[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(5): 001-013.

言有着至关重要的作用。

当传统枪炮在空气中发射时，在扳机的触发下，火药在药室内被点燃，并充分燃烧，形成高温高压的火药燃气，燃气迅速膨胀，并作用于射弹底部，使其沿身管发生轴向向前运动，不断压缩弹前空气，使得弹前激波随之产生，且在弹丸的推动作用下喷出膛口，经过无约束膨胀过程，膛口处的流场结构初步形成。随着射弹完成出膛过程，弹后的火药燃气在膛口处由于射弹的挤压作用发生受限膨胀，并耦合前面所形成的膛口初始流场，使得最后的膛口流场波系结构呈现出错综复杂的情况^[2]。

相比于空气中发射环境介质的单一性，当枪炮类武器在水中环境发射时，由于射弹自身较高的运行速度，使得周围压力低于水的饱和蒸汽压力，从而产生空泡。空泡逐渐演化生长，直到产生超空泡现象，将射弹自身全部覆盖。此外，火药在药室内被点燃形成大规模火药燃气，在与环境条件所存在的大压力梯度和温度梯度的驱动下，逐渐喷出膛口，继而产生明显的气液交界面，进一步逐渐形成差异于空气中发射的多相膛口流场，这将大大提高此类问题的研究难度。此外，弹丸在水中所受到的高阻力将会导致形成高强度的弹前激波，并且在更大程度上对燃气冲击波产生压缩作用，从而给武器结构造成破坏。因此，需要对水下枪炮发射的整个过程进行系统的研究，进而改善此类枪械的设计精度和结构强度，以适应水下枪炮发射问题中更为复杂的流场环境。

从上述问题分析中可以看出，对水下枪炮发射过程的研究从先后顺序上涵盖了内弹道和膛内流场特性问题以及膛口流场特性和外弹道问题，涉及到多相流、燃气射流、气体动力学以及水动力学等多个复杂领域，因此具有相当高的研究难度和研究价值。图1对这一问题的研究思路做出了总结。

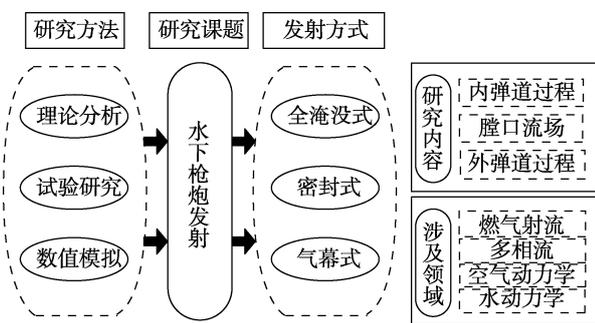


图1 水下枪炮发射问题研究思路

Fig.1 Design idea of underwater gun launching

从军事需求角度而言，由于海洋资源的经济和战略地位不断提升，使得我国必须要建立起一支强大的海军力量。我国目前已自行研制出了多种不同型号的舰艇，并相继投入使用，这组成了海军的中坚力量。与地面武器差异之处在于，海军装备不仅要面临来自

敌方空中和陆地的火力打击，还要随时提防水下所带来的威胁，诸如反舰鱼雷、反舰导弹以及蛙人部队突袭等，这些潜在的危险将会在无法对水下情况进行清晰准确地探测时给我方舰艇带来巨大威胁。对于舰艇自身而言，固然具备一定的反导弹、反鱼雷手段，但往往在探测识别能力不足时，只能起到一定的近程防御效果。相比而言，传统火炮武器具有更强的毁伤能力和较低的经济成本，同时传统枪械在面对敌方小股蛙人部队来犯时具有更加灵活稳定的打击能力和防御手段。然而，要对水下目标展开打击，如果借助传统枪炮类武器会存在打击精度、射击范围不足以及跨介质弹道等诸多限制。因此，研制全水下枪炮武器的发射问题对于提升我国的海军实力具有至关重要的作用，直接关系到我国国防实力和国际竞争力的强弱水平。

相比之下，水下枪炮的设计复杂度远大于传统枪炮武器，原因主要包含以下几点：

1) 水的密度在数值上为干燥空气密度的 800 多倍，这种大差异将会使得弹丸的射程与稳定性在水中发生骤减。

2) 在枪械发射过程中，火药燃气推动弹丸飞出膛管，在无法保证完全密封的条件下，将会发生水倒灌入膛管的现象，以至于浸湿火药，使得燃烧效率大大减小，进而降低推进能力，甚至会损坏枪械结构，发生危险。

3) 面对水中的高阻环境，要保证水下枪械的射速和射击距离，则枪管的膛压需要增大到一定的水平，但这会使得供弹难度提高，进而无法保证整个枪械结构的协同运作。

4) 过于复杂的枪械结构将会增加机体受到侵蚀的可能性。

早在 20 世纪 70 年代，苏联研究所制造出专门装备于海军蛙人部队的 SPP-1 型水下手枪。这一枪型专用于水下作战，配有专门的 SPS 水下长杆箭形弹，弹夹容量为 4 发，击发方式为旋转击发^[3]。同一时期，德国 HK 公司研制出了 P-11 水下手枪，该水下枪械共装配了 5 根密封枪管，弹容量为 5 发，但无法完成自动装填^[4]，因此不能保证在水下环境持久作战。我国在水下枪械领域的发展过程逐渐由国外引进仿制模式过渡到自主研制模式，这也说明我国对水下轻武器的研究已经进入了一个新的阶段，这也更需要投入足够的精力和资源去展开这一领域的进一步拓展，以便于应对常规水下作战高机动性和灵活性的军事需求。

1 水下枪炮发射方式概述

目前，在进行水下枪炮发射的研究设计工作时，水下全淹没式和密封式是较为常用的 2 种发射方式。

近期, 水下气幕式发射作为一种新兴的水下发射方式被提出, 逐渐受到研究人员的重点关注。

1.1 水下全淹没式发射

水下全淹没式发射方式, 是将枪炮身管完全置于水中, 在管口处不带有任何密封装置。当药室中火药被点燃时, 将会产生高温高压燃气, 推动弹丸在膛管中向前运动, 弹前水柱同时向管口推进^[5]。水下全淹没式发射的结构如图 2 所示。

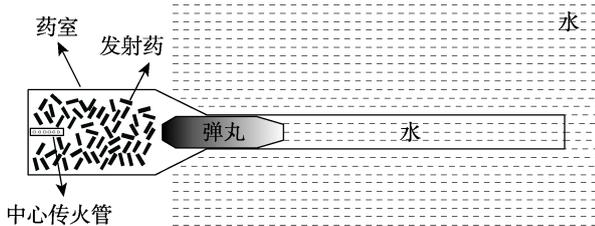


图 2 水下全淹没式发射示意图

Fig.2 The schematic of underwater fully submerged launching

由于水的黏性和密度远高于空气, 使得在这种发射方式下, 无法忽略弹丸前的水柱对自身运动的影响, 因此在关注弹丸膛内运动的同时, 还需要专门研究弹前水柱的发展规律^[6]。孔德仁等^[7]对水下全淹没式发射的内弹道特性展开了研究, 并阐述了其规律变化情况, 建立了全水下非导气内弹道模型, 研究对象为弹丸和弹前水柱, 以此开展了数值仿真计算和对应的实验验证工作。

水下全淹没式发射方式结构设计较为简单, 然而之前的研究往往假定弹丸与膛管之间不存在间隙, 这就使得弹丸在弹前水柱质量的作用下往往伴随着较大的阻力和膛管压力, 相应地限制了弹丸的初始速度。之后的研究逐渐引入了弹丸与膛管之间的间隙假设, 使得发射时部分火药燃气会通过间隙推动弹前水柱加速喷出膛口, 从而减弱其对弹丸运动的阻碍作用。与空气中发射不同, 这种水下发射模式下还需要将水柱出膛动压、膛口流体静压以及水与膛管摩擦阻力等参数考虑在内。在这种模式下, 将会使得水下枪炮膛内的压力得到有效控制, 并在一定程度上确保射弹能够按照规定速度完成射击过程。

1.2 水下密封式发射

水下密封式发射方式通过在膛口处安装密封装置, 阻止水进入膛管, 进而保证这种发射方式下的内弹道过程与空气中发射保持一致。在这种水下发射方式下, 设置的密封装置能够保证弹丸在膛管内部的运动在气体环境下完成, 从而减少这一阶段弹丸所受到的阻力作用, 以此提高发射过程的安全性和弹丸初始速度, 避免枪械自身受到侵蚀。水下密封式发射的结构如图 3 所示。

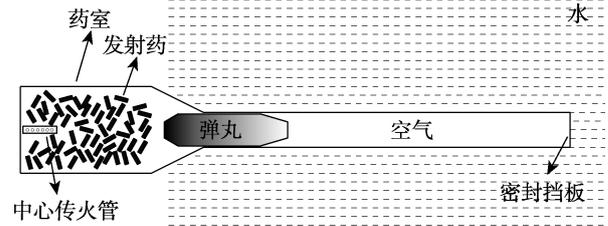


图 3 水下密封式发射示意图

Fig.3 The schematic of underwater sealed launching

Stace 等^[8]和 Fu 等^[9]首次提出了水下密封式发射装置的概念, 并介绍了这一水下发射方式的运行机理。对于密封式发射而言, 当上一发弹丸发射以后, 若密封挡板来不及关闭, 则可能会引发液体回流入身管的问题, 因此需要及时将身管内的液体排出, 并再次将身管密封起来, 这种运行机制就会使得这种发射方式下对于枪炮结构的设计变得十分复杂。此外, 当弹丸在密封状态下的膛管内部运动时, 由于弹丸速度总大于弹前空气速度的缘故, 将会导致产生弹前激波。对此, 刘育平等^[10]将水下火炮密封式发射装置作为研究对象, 展开了数值仿真工作, 并成功证明了弹前激波的存在, 同时根据计算结果得到弹前激波能够增大膛压, 并减小弹丸初始速度的分析结论。梅雄三等^[11-12]提出利用弹前激波压力实现膛管排水的方法, 并借助数值仿真计算, 得到了弹前激波的变化规律, 以此来控制密封装置的开闭时间间隔。此外, 他还建立了二维膛内弹丸运动模型, 以此模拟弹丸在身管内的运动过程、弹前激波的演变规律以及炮口流场的形成与发展, 并运用多刚体动力学理论, 借助数值仿真方法验证了这一发射方式的可行性。

1.3 水下气幕式发射

水下气幕式发射是一种近年来新提出的水下发射方式, 最初用于潜射导弹的发射, 之后逐渐拓展到水下枪炮发射领域, 可用于实现弹丸减阻。在水下枪炮气幕式发射过程中, 火药燃烧所产生的燃气最初会有一部分通过喷孔形成弹前气幕, 弹丸前方的水柱在气幕的推动作用下沿身管向前移动, 进而使得弹前流体环境由水变为空气, 致使弹前压力大幅度降低, 以此实现弹丸在身管内部的低阻高速运动。水下气幕式发射的结构如图 4 所示。

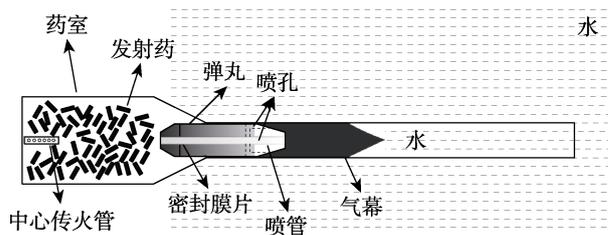


图 4 水下气幕式发射示意图

Fig.4 The schematic of underwater gas curtain launching

结合图4,对水下气幕式发射的内弹道过程进行阐述:首先发射药在底火射流的作用下被点燃,喷孔内嵌的密封膜片处于关闭状态,将火药燃气与空气分隔开来;随着火药燃气压力的升高,密封膜片被打开,发生气体混合,从而形成弹前泰勒空腔;当气液掺混过程逐渐加剧时,空腔向气幕转变,使得弹前水柱发生移动;随后,弹丸在进一步增压的火药燃气推动作用下向前移动,气幕范围产生扩张,进而使得气幕和弹丸先后从膛口喷出。通过以上过程分析得知,在内弹道及弹丸膛内运动方面,气幕式发射具有较高的研究难度,但相比于全淹没式发射的高阻低速以及密封式发射结构设计复杂的缺陷,无疑更适用于开展水下枪炮发射问题的研究工作。

对水下气幕式发射的研究最早可追溯到20世纪90年代,美国学者Larson等^[13]提出了同心筒发射(CCL)的概念,使用2个同心圆柱体之间的环形空间作为管道来排放导弹发射排出的废气,避免了冷发射系统的复杂性问题,同时减弱了热发射中严重的烧蚀现象,引起了学者广泛关注。2001年,Yagla^[14]提出将同心筒发射技术应用到水下,利用导弹废气在发射筒上方制造水蒸气和废气掺混的环境,这一汽-液环境能够有效提高导弹发射的喷射速度,并降低初始运动阻力,最终将其称为气幕式发射(WPML)。2010年,Weiland等^[15]针对气幕式发射方法开展了进一步数值研究,通过试验数据推导了横流引起的气体射流偏转轨迹,并进一步阐述了水下气幕式发射在潜艇横移速度和发射深度上的局限性,但其在综合性能上还是优于传统的导弹发射技术。在国内,直到近些年才开始进行气幕式发射的相关研究工作。2010年,程栋等^[16]通过将理论与试验相结合,总结出计算气幕保护上下边界的工程计算方法,并计算出气幕保护系统的气体射流有效截面和射程距离,计算结果与试验数据取得了良好的一致性,对指导水下气幕式发射保护系统的设计具有重要意义。侯金瑛等^[17]针对潜射导弹的同心筒发射装置,建立了二维内流场模型,通过数值方法,基于单相高速气体射流模型,对水下同心筒装置内气体的流动细节开展了研究,在保证计算精度的情况下,发现该方法的计算效率高于传统的VOF模型。曹伟等^[18-19]通过数值仿真方法探究了头部形状和射流速度对水下航行体气幕式发射运动过程的影响规律,发现航行体头部形状对气幕形态和流体特性并无太大的影响,而射流速度的增大将会提高航行体的总阻力系数,且此系数将会伴随出水过程呈现出逐渐下降的趋势。

周良梁等^[20]将气幕式发射应用到水下枪炮的发射中,结合超空泡射弹技术,实现了弹丸水下航行减阻。他们设计了可视化模拟实验装置,获取了弹丸运动与液流相互作用的高速影像,并探究了不同喷射参数给发射过程带来的影响。结果表明,当喷射压力增

大时,弹丸速度也随之获得提升;同时在斜面喷孔尺寸增大的条件下,气幕减阻性能更好,进而弹丸也能获得更大的运动速度。周良梁等^[21]通过高速摄像方法,结合三维非稳态仿真模型,对充液圆管中喷头运动过程的气幕生成特性开展了研究,发现喷头运动抑制了流场回流作用,增强了对气幕前端液体的推动作用,降低了气幕顶部中心区域温度,却提高了壁面处温度。此外,他们还模拟了气幕在充液圆管内的产生以及发展过程^[22-23],并探究了喷射结构的差异带来的影响,以及燃气射流与液体工质之间的相互作用机理,得到了多股燃气射流在有限空间内气液两相的参数分布情况,为水下枪炮气幕式发射的研究提供了一定的实验依据。张欣慰^[24]在水下枪射击试验平台的基础上,设计了弹道枪在不同介质下射击过程的内弹道特性模拟试验,分别模拟了空气中以及3种水下发射方式下弹道枪的设计过程,并进行了对照分析。同时,他还对弹道枪水下气幕式发射过程的内弹道过程进行了物理建模,并耦合多相流模型,开展了多个典型工况下的仿真计算工作,在一定程度上获取了部分水下枪气幕式发射内弹道及气液相互作用特性。在此基础上,将气幕式发射的试验和仿真结果与传统全淹没式发射相比,发现在保证膛口速度近似相同的情况下,气幕式发射的膛压仅约为后者的36%。这说明采用气幕式发射能够显著提升水下枪内弹道性能,实现弹丸大幅减阻^[25]。Hu^[26]提出了一种在枪管内壁设立矩形沟槽的水下气幕式发射结构方案,并建立了对应的三维非稳态模型,以此探究沟槽的长宽比对发射过程的影响。结果表明,当长宽比增加时,近壁面处排气效果增强,而中心管处效果减弱,同时会伴随着射弹头部压力水平的升高。

2 水下枪炮发射内弹道研究进展

对于枪炮类武器的设计工作而言,内弹道学具有至关重要的作用,其主要针对弹丸在膛内的运动规律及其伴随射击现象,涉及问题包含火药的燃烧传热规律及火药燃气的生成、膛内火药燃气和火药颗粒的多维多相流动及其相间输运现象、膛内压力波的发展规律、弹丸运动规律以及膛内能量转换等多个方面^[27-28]。综上所述,内弹道学是一门涉及多个领域的学科,因此针对水下枪炮发射的内弹道研究过程必然更加复杂,目前国内的研究人员已经开展了不少相关工作。本节首先对水下枪炮全淹没式发射内弹道过程展开分析,并对国内相关研究现状进行总结。

2.1 水下枪炮内弹道过程分析

下面对水下枪炮全淹没式发射内弹道过程的运动特性和能量特性展开分析。内弹道的运动过程大致如下^[29]:

1) 点火阶段, 弹丸后方底火在扳机触发下引燃, 使其中的点火药发生燃烧, 从而产生高温高压燃气, 通过小孔进一步点燃药室内的发射药, 完成点火过程。

2) 当药室内的火药被成功点燃, 随即产生的高温高压火药燃气, 迅速推进弹丸向前运动, 进而使得弹前水柱不断向身管口处移动, 同时弹前水柱也对弹丸产生一定的阻碍作用。

3) 当弹丸成功进入膛内后, 速度逐渐增加, 并推动弹前水柱加速向前, 然而此时两者的运动速度并不是很高。随着火药燃烧程度逐渐加深, 弹丸后方逐渐积聚了大量高温高压火药燃气, 此时膛内压力发生骤增。在这种作用下, 弹丸及水柱速度迅速升高, 进而弹丸受到的阻力与水柱受到枪管的摩擦力也随之增大。随着水柱流出身管, 使得水柱受到的阻力不断下降, 因此弹后容积得到扩张, 进而膛内压力减小。在上述双重作用下, 弹丸在运动一段距离后, 压力达到峰值。在此之后, 弹丸继续向前做加速度逐渐减小的加速运动。

4) 当火药完全燃烧后, 将不再产生新的火药燃气, 但原有的火药燃气还存在相当一部分未利用的能量, 这使得弹丸继续向前加速运动, 伴随着逐渐减小的膛内压力。

5) 此时弹丸的头部已出身管口, 身管内部已不再有水柱残留, 弹丸受到来自身管外水域的流体作用力和弹后压力进一步加速, 但弹后的压力也越来越小。

相比于空气中发射的内弹道过程, 水下枪炮内弹道还存在由于流体运动所消耗的各种能量。另外, 在弹丸运动过程中, 流体压力不断对其做功, 因此有必要对水下枪炮发射过程中的能量特性进行总结分析^[29]: 弹丸在运动过程中存在自身动能; 弹前水柱在运动和喷出管口时也存在动能; 弹丸前端水柱沿程损失会消耗一定的能量; 对于既定发射深度, 存在静水压力做功消耗的能量; 火药燃烧产生的高温高压燃气运动会产生能量。上述能量形式皆由火药燃烧所产生的热能转换而来, 但由于能量转换并不完全, 使得火药气体内部仍存留大量的能量, 最后会经由身管流出。

2.2 水下枪炮内弹道过程研究现状

国内对于传统枪炮武器空气中发射的内弹道研究成果已经日趋成熟, 但目前有关水下枪炮发射内弹道过程的研究仍处于探索阶段。

早于 1998 年, 孔德仁等^[7]对比分析了水下枪械内弹道与常规枪械内弹道之间的差异, 以弹丸与弹前水柱为研究对象, 建立了水下枪械内弹道计算模型, 并借助实验验证了相应的仿真计算工作。兰晓龙^[29]建立了水下枪械内弹道仿真模型, 并介绍了内弹道方程组的解法及仿真计算方法, 将仿真计算结果与试验结果进行了分析比对, 最后探究了装药量、火药力、弹质量以及启动压力等参数对水下枪械发射的影响规

律。朱斌^[30]建立了某小口径火炮的内弹道模型, 并借助 CFD 计算出了弹前阻力, 进而将内弹道和膛口初始流场进行耦合计算, 开展了内弹道数值模拟工作, 得到了与已有试验数据相符合的结果。张涛等^[31]将锥膛炮作为研究对象, 推导出水下内弹道基本方程组, 并针对某型锥膛炮展开数值模拟计算, 得到了身管长度对发射性能的影响规律。

何小英等^[32]介绍了可同时满足多种深度发射的内弹道仿真方法, 并建立了对应的水下发射内弹道计算模型, 提出并证明了由多燃气发生器组成的弹射动力系统是解决变深度发射导弹问题的有效途径。孟祥宇等^[33-34]将枪弹间隙和弹炮间隙引入水下全淹没式发射的研究之中, 运用 AUTODYN 有限元仿真软件对内弹道过程进行了数值模拟, 针对有无间隙和不同的装药量等工况, 探求其对水下枪发射内弹道变化规律的影响。结果表明, 当枪弹之间设置 0.1 mm 间隙时, 能够显著降低弹丸所受阻力, 从而提高毁伤性能。此外, 他们还建立了涉及弹炮配合间隙和两相流相间作用的内弹道模型, 进行数值仿真计算, 并开展了如图 5 和图 6 所示的实弹射击实验验证工作, 最终得出弹炮间隙能够有效改善原有发射方式下膛压过高和弹丸射速不够的结论。

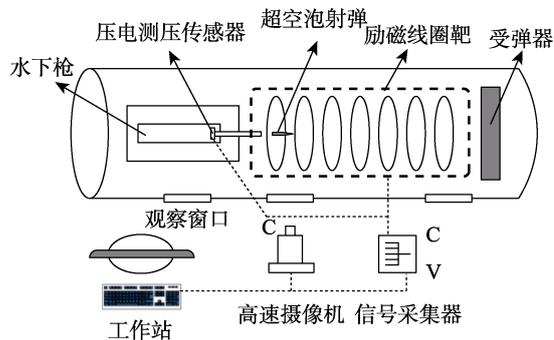


图 5 实验系统^[33]

Fig.5 Schematic of experiment system^[33]

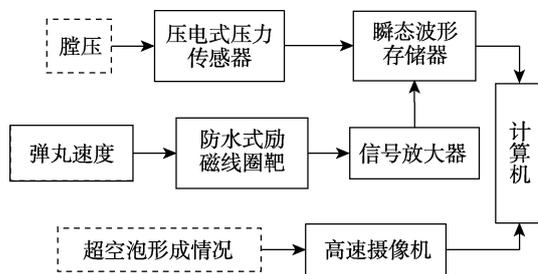


图 6 测试系统结构^[34]

Fig.6 Sketch of testing system^[34]

3 水下气体射流问题研究进展

在现今的诸多领域中, 射流理论皆具有不俗的地位, 对于航空航天、材料化工以及水电工程等行业

的发展都起到了重大的促进作用。射流的概念为流体从喷嘴或者喷孔射入同种或异种流体的流动,而当射流所喷射的流体为气体时称为气体射流^[35-37]。对于水下枪炮发射问题的研究而言,由于火药燃烧后所产生的高温高压燃气会在身管以及膛口外 2 种不同的环境发生气体射流现象,差异在于前者发生在受限空间,而后者发生在自由空间,因此 2 种气体射流现象分别称为水下自由气体射流和水下受限气体射流。在火药燃气与水相互作用的过程中,整个流场内部进行着复杂的物理化学变化。

下面简单介绍水下气体射流的产生过程。气体在水中喷射所形成的射流形态与气体流量直接相关,一般而言,当气体喷射流量较小时,会有相互独立的气泡流生成,而若要形成完整的气体射流,则相应地需要较大的气体喷射流量。现阶段国内外学者已开展了大量关于水下气体射流各种机理和应用性的研究。国外冶金领域较早开展了水下气体射流问题的研究。1979年,Hoefele等^[38]通过在不同组分液体(如水、汞等)中喷入空气、氦气等多种气体,探究了金属冶炼过程中喷嘴附近的严重腐蚀现象。Ozawa等^[39]将氮气和氦气注入到水中,通过高速摄像直接观察了气体射流现象,发现随着气液密度比的增大,在声速区更容易发生气泡流到射流的转变。

此后,水下射流受到学者广泛关注。Loth等^[40]借助试验研究了圆形气体射流在静水中的结构特性和掺混效果,测量了沿轴的静压分布、间隙率以及夹带率,发现水中欠膨胀空气射流存在一个包含冲击波的外部膨胀区,与空气中欠膨胀射流类似。Arghode等^[41-42]研究了全淹没条件下燃烧室排气与周围水体的相互作用特性,针对圆形、方形、三角形和椭圆形喷口开展了高速摄像试验研究,考虑了燃烧室声压级、压力波动以及两相区域不稳定性,发现射流不稳定频率随射流动量的增加而增大,与喷口截面无关,气体内的压力波动与射流区下游的两相不稳定性密切相关。Medvedev等^[43]借助试验手段证明了在充液室中通入燃气后压力波的存在,并阐述解释了压力波在气体燃烧和水下射流扩展过程中是如何进行传播的。此外,他们发现在小燃烧室长度条件下,会得到最大平均推力;相反,当燃烧室长度较小时,将会获得最大比冲。

国内较早开始研究水下气体射流的是上海交通大学的鲁传敬等^[44],他们针对轴对称导弹点火这一非稳态过程,提出了将喷管中的燃气流动按一维非定常无黏完全气体流动处理,喷入水中的燃气流采用简化的等压气泡模型,借助 Euler-Lagrange 方法对气泡的发展过程进行了模拟,获得了导弹水下点火的一些流场参数变化情况。2000年,戚隆溪等^[45]通过研制的水下高速气体射流实验系统,对水下射流开展了动力学研究,提出了当水下高速气体射流发生欠膨胀现象

时,附近会有复杂的波系结构生成,进而在气-水两相的相互掺混之下,将会出现较空气中更快的欠膨胀气体射流均压化衰减过程。2007年,Liu等^[46]对水下导弹发射过程中的多相相互作用进行了数值研究,讨论了喷管后的马赫数分布、压力分布,以及不同初始速度、燃烧室总压力和水深对喷管内亚音速气体的流动以及压力的影响。结果表明,调整药室总压可以提高发射性能。2011年,汤龙生等^[47]通过燃气发生器在水下实验装置中模拟水下燃气射流过程,观察期间气泡产生和发展的过程,并研究了压力波在水介质中的衰减规律,发现气泡的生长与破裂伴随着压力脉动在水中传播,能量在水中快速衰减。胡勇等^[48]通过数值仿真工作模拟了水下超空泡航行体尾部燃气射流与通气空泡之间的相互作用,发现燃气射流与通气空泡流相互作用后生成了多相尾流,空泡明显收缩,航行体阻力系数变大。当通入较少气体并保持燃烧室高压的条件时,可以观察到航行体尾部回射流的存在,这将提高喷管外部的压力水平。陈焕龙等^[49]针对喷管燃气射流,探究了发射深度的影响规律,得出以下结论:当发射深度提高时,将会形成逐渐明显的燃气泡翻转现象,并形成显著的压力脉动,同时喷管推力将以类似于燃气总压的变化规律随之下降。许海雨等^[50-51]基于 VOF 模型研究了水下超声速喷射流场压力脉动特性及其对上浮水雷的受力影响特性,并对高温高压燃气水下高速射流过程进行了数值建模,针对单相水和通气超空泡 2 种来流条件对火箭发动机的内外流场展开了仿真计算,进而得到了火箭发动机尾喷流场受工作压力、通气超空泡等因素影响的详细变化情况。

近些年来,在水下燃气射流的研究方面,南京理工大学的余永刚教授团队开展了较为系统的研究。薛晓春等^[52]采用设计的燃烧气体发生器和五级圆柱形阶梯壁观察室,研究了高温高压下双股水下燃气射流流场的分布情况,发现喷嘴间距较小时,双燃烧射流的轴向速度和加速度较大,且收敛时间较早,合理匹配参数能够抑制射流失稳,使燃烧气体能量有序释放。胡志涛等^[53-54]通过搭建试验装置,模拟了多股贴壁燃气射流在圆柱形充液室内的扩展过程,借助高速摄像系统,对试验数据进行了收集和分析,得到了喷孔个数、喷孔面积以及喷射压力等参数对燃气射流扩展特性的影响规律。此外,他们还采用 VOF 多相流模型,分别对圆形和矩形燃气射流在受限液体内的扩展过程进行了数值模拟^[55],并与已有试验结果进行了对比验证,结果十分吻合,进而得到了不同射流类型对应的流场演化特性及参数变化规律。赵嘉俊等^[56-57]采用试验与数值仿真结合的方式,研究了锥形分布的五孔射流在充水容器中的流场分布,发现射流收缩和气液夹带均影响流场中的激波结构。在此基础上,他们还模拟了多股燃气射流自弹头喷入受限液体的泰勒空腔形成过程^[58],并探究了侧喷孔数量所产生的影

响规律,发现随着侧喷孔个数的减少,空腔会以更慢的速度发生聚集,并在腔内保持相对均衡的压力水平,但径向压力的平均水平将会明显下降。周良梁等^[59-60]采用设计的多喷嘴燃烧器开展了水下燃气射流形成气幕的试验研究,并进行了对应的仿真工作,与试验现象取得较好的一致性。结果表明,气体膨胀时,液体介质的速度持续增大,混合区域有较强的速度波动,射流前端的气体会压缩形成高压区域。

综上所述,直到现阶段,水下燃气射流领域逐渐形成了十分完备的研究手段和相关理论体系。但对水下枪炮发射过程中的燃气射流问题,目前还缺乏充足的试验数据来对相关仿真计算结果和理论分析进行佐证,还需要进一步的研究工作来提供事实基础,从而建立更为成熟的理论体系来指引试验研究和仿真计算。

4 水下枪炮发射膛口流场研究进展

枪炮类武器在水下发射的过程中,随着射弹逐渐运动出膛口,弹后的高温高压火药燃气会随后在膛口处扩展成水下膛口燃气流场。当水下膛口流场与射弹相互耦合作用时,将逐渐出现十分复杂的激波结构,同时受到两相交界面的干扰作用,进而使得水下膛口燃气流场呈现出较为强烈的非定常特性,这将反过来对射弹自身的弹道轨迹造成一定程度的干扰作用,极大地影响射击过程的精度和稳定性。因此,基于保证水下发射过程安全准确完成的目的,必须对水下发射膛口流场的发展规律和作用特性展开周密的研究工作。本节阐述了水下枪炮发射膛口流场的研究现状,并对膛口流场的典型波系结构展开分析介绍。

4.1 水下枪炮发射膛口流场研究现状

现阶段,已有不少研究人员针对传统枪炮空气中发射的膛口流场特性开展了周密研究,也具备了一定的理论基础。早于 20 世纪 80 年代,Moretti^[61]就从理论分析角度对膛口流场的数值分析方法进行了论述,并在此基础上借助算例完成了仿真模拟验证工作。Schmidt 等^[62]利用高速摄像机拍摄小口径枪射击过程中的膛口流场演化过程,并成功捕捉到了膛口流场激波,以此对膛口多相流场的变化规律做出了分析,尤其着眼于多相流场对弹丸运动特性的干扰展开了详细阐述。尤国钊等^[63]详细分析了有关膛口流场仿真计算的研究现状,同时借助算法模拟了自动步枪的射击过程,并成功完成了实验对照验证工作。代淑兰等^[64-65]利用流场仿真软件模拟了高速弹丸的运动过程,以及制退器的膛口流场演化规律,并对膛口流场结构受到运动弹丸的影响规律展开了分析。江坤等^[66]建立了膛口流场数值模型,并采用动网格技术耦合了湍流模型,对带制退器装置的火炮膛口流场开展了数值仿真

计算工作,分析和讨论了初始流场和火药燃气流场的变化规律。

对于弹丸的水下发射过程而言,由于受到的阻力远超过在空气中受到的阻力,且还会受到火药燃气的影响,使得在进行膛口流场研究工作时变得更为复杂。国内外相关研究的公开资料不是很多,同样也没有成熟的理论指导试验和仿真工作。蔡涛^[67]从试验研究和数值计算 2 个角度研究了 30 mm 舰炮的水下发射膛口流场特性,研究了全淹没式和密封式 2 种发射方式下膛口多相流场的形成演变规律,并分析了膛口装置对膛口流场分布的影响规律。余永刚团队针对水下枪炮发射膛口流场开展了一系列试验研究和数值仿真工作,针对装药参数^[68]、枪口压力^[69]和发射深度^[70]等多个参数对水下枪炮发射膛口流场的影响规律展开仿真计算工作,得到了不同工况下膛口激波结构、压力分布、马赫数分布等流场特性发展情况,并开展了相应的实验验证工作。

此外,张京辉等^[71-72]采用动网格生成技术,建立了水下弹道枪膛口流场二维轴对称仿真模型,针对 14.5 mm 水下枪,研究了在不同燃气喷射压力下的流场发展变化情况。结果表明,当弹丸发射时,膛口处由于火药燃气流场和初始流场的耦合作用具备复杂的流场波系结构。同时,他们定量地对比分析了全淹没式和密封式 2 种常见水下发射方式下的内弹道参数及膛口特性,发现相比于全淹没式发射而言,密封式发射时的膛内压力发射峰值仅为 38%,但射弹到达膛口时的速度却已达到前者的 130%。另一方面,密封式发射能够更快地在膛口处形成瓶装激波,并具有更高水平的膛口压力峰值,但相应也伴随更快速和更大幅度的压力衰减。张旋^[73]在其基础上进一步对水下发射膛口流场特性展开了研究,并探究了有无初始流场条件下对膛口流场所带来的影响。张欣尉等^[74]建立了 12.7 mm 水下枪气幕式发射的数学物理模型,并通过实验模拟和数值仿真验证了其合理性,进而证明了借助气幕实现射弹低阻发射的可能性。此外,他们还验证了中心喷孔结构能够有效形成水下气幕,对弹丸飞行过程中的运动和流体参数变化进行了监测,并对比分析了全淹没式和密封式变化的规律及内在成因。

4.2 水下枪炮发射膛口流场典型波系结构分析

以张旋等^[75]对 30 mm 火炮在空气中及水下密封式发射条件下膛口流场的数值模拟研究为例,对空气中和水下枪炮发射膛口流场的典型波系结构展开对比分析。当弹丸出膛口之后,弹后的高温高压火药燃气将迅速喷出扩展,当射流滞止压力与环境压力达到一定的比值时(一般为 3~4),流场结构中将会有瓶状正激波结构形成,称为马赫盘。此时的射流过程属于高度欠膨胀射流,空气中发射和水下发射时的膛口

燃气射流波系结构分别如图7、8所示。

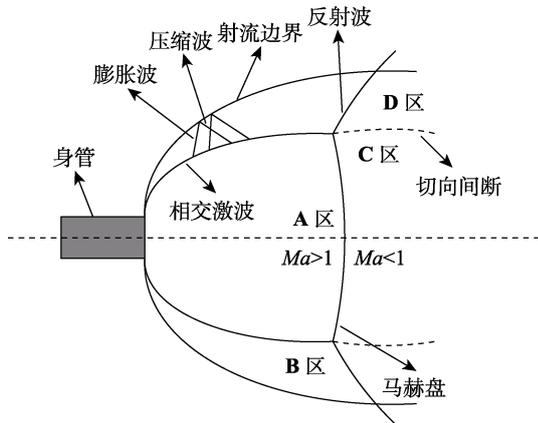


图7 空气中发射典型膛口流场波系^[75]
 Fig.7 Diagram of typical muzzle flow field wave system when emitted in air^[75]

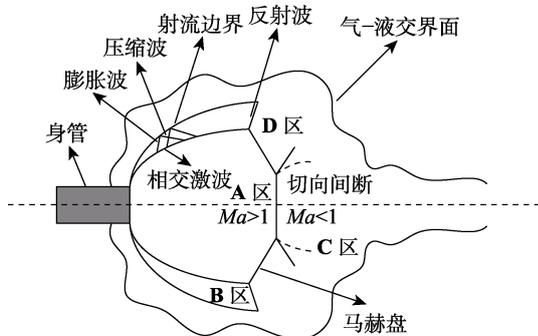


图8 水下发射典型膛口流场波系^[75]
 Fig.8 Diagram of typical muzzle flow field wave system when emitted in water^[75]

其中对于 A 区而言，主要发生火药燃气的自由膨胀现象，进而大大降低压力水平，导致气流发生加速流动现象，使得此区域为超音速气流（马赫数大于 1），形成瓶状激波内的自由膨胀区；B 区为相交激波与反射边界之间的超音速区域，此区域内伴有膨胀波和压缩波的存在；C 区是位于马赫盘下游的亚声速区域（马赫数小于 1），此处由于气流经过正激波的作用被压缩，导致压力和温度得到大幅度提升，气流速度随之下降；D 区为少部分气流经过 2 次斜激波后所形成的超音速区域，尽管燃气压力与 C 区保持一致，但由于 2 个区域内的气流速度不一致，使得之间会形成如图 7、8 中所示的切向间断面。比较图 7、8 可以发现，尽管在空气和水环境中膛口处都会生成马赫盘，但两者的形状却存在着一定的差异，前者呈现圆弧形，而后者呈现梯形。这是由于枪炮在水下发射时，火药燃气在膛口流场的形成过程中会受到来自高密度水的阻碍，射流前端高压区的存在使气体产生回流现象，进而对射流的主通道实现一定程度的剪切作用，使得气流存在径向不稳定，燃气射流扩展过程中出现颈缩现象，从而激波核心区受到影响，呈现出图 8 中所示的梯形状，造成了马赫盘形状上的差异性。

水下发射过程中几个典型时刻的膛口马赫数分布相图及纹影如图 9 所示。可以看出，在图 9a 中 t_1 时刻，射弹刚刚脱离炮口，此时由于弹后火药燃气在射弹和水的挤压作用下主要发生径向膨胀作用，使得炮口两侧位置气流马赫数较大。之后在气体射流进一步扩展的过程中，轴向激波结构逐渐清晰，并在 t_2 时刻（见图 9b）能够观察到马赫盘的初步形成。在射弹不断向前运动的过程中，弹后的火药燃气流场得到了充分扩展，整个激波区域面积获得提升，使得马赫盘整体沿弹轴方向向前推进，直径逐渐增大。直到 t_3 时刻（见图 9c）可以发现，马赫盘结构已经变得清晰，同时入射激波、反射激波以及马赫盘在流场中某处形成三波点结构。在 t_4 时刻（见图 9d）能够看到，激波结构已经完全形成，可以明显观察到完整的梯形马赫盘。

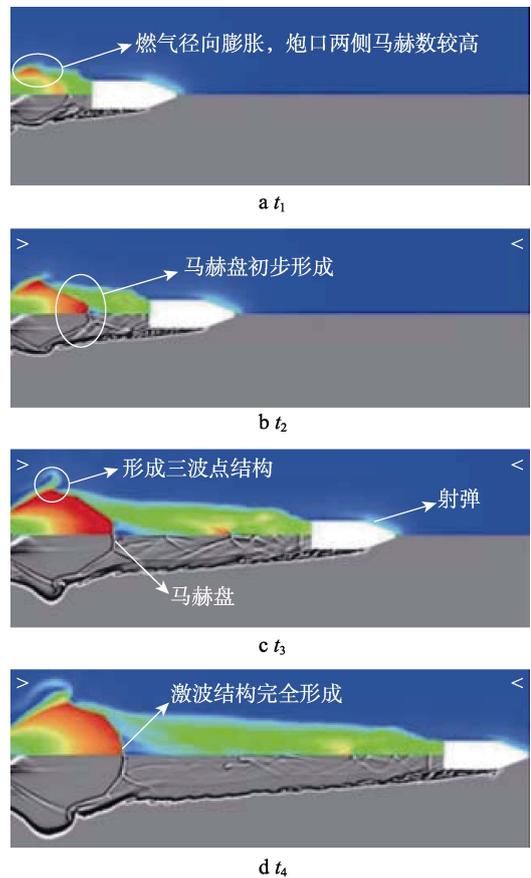


图9 水下发射时膛口马赫数分布及纹影^[75]
 Fig.9 Mach number distribution and schlieren diagram at muzzle when emitted under water^[75]

相比而言，水下枪炮发射的膛口流场所形成的马赫盘结构在时间上比空气中发射更快。这是由于水下发射时燃气射流会受到气液交界面的阻碍作用，但在空气中这种阻碍作用十分微弱，使得射弹后方流场会由于弹丸的挤压而形成激波，从而阻碍马赫盘生成，并且最终生成的激波自由膨胀区域将会比水下发射时的面积更大。

5 结语

综上所述, 现阶段对于水下枪炮发射问题的研究已经取得了许多重要的进展, 众多研究人员通过理论分析、试验研究和数值模拟对于水下枪炮发射方式、内弹道、水下气体射流以及膛口流场等几个方面开展了不同层面、不同角度的研究工作。

1) 对于水下枪炮发射方式, 目前较为常用的主要有水下全淹没式和水下密封式发射 2 种, 其中水下全淹没式发射的弹前阻力和膛内压力较大, 使得弹丸无法获得既定的初始速度, 从而影响射击距离和毁伤能力, 而引入枪弹间隙或弹道间隙可有效改善上述问题。密封式发射需要密封装置, 结构设计难度较高, 因此应用度不及前者。气幕式发射作为一种新兴的水下枪炮发射方式, 综合性能较前 2 种方式更优, 有待进一步开展研究。

2) 在水下枪炮内弹道及膛内流场研究方面, 已有不少研究在传统内弹道学基础上进行了改进。考虑弹前水柱及弹后激波等诸多水下环境中特有的因素, 建立了适用于水下枪炮发射的内弹道模型方程组, 并耦合多相流模型。在此基础上, 开展了相关的试验研究和数值仿真工作。

3) 在研究水下枪炮发射问题的过程中, 需要着重考虑火药燃气在膛内及膛口的发展过程, 因此还涉及到水下燃气射流领域。目前该领域已具备较为完善的理论体系, 但在水下枪炮发射问题中的应用, 还缺乏充足的试验数据为已有研究成果提供实践依据。

4) 截至目前, 水下枪炮发射问题的膛口流场研究国内尚处于起步阶段, 已有一些团队专门从事相关研究, 并从试验和仿真计算中得出一些研究结论, 取得了不错的进展。但从发表的文献中不难发现, 一些结论性叙述尚缺乏成熟的理论体系, 因此需要进一步更加全面地展开研究。

在这一领域有以下几个方向可考虑优先发展:

1) 发展新型水下枪炮发射方式。现阶段, 常用的水下枪炮发射方式存在全淹没式和密封式 2 种, 两者皆有着自身的缺陷, 因此在开展研究工作时存在一定的局限性。通过研究人员的试验测试结果发现, 最新提出的水下气幕式发射对于水下枪炮发射的综合性能可以实现显著提升, 并且无需较为复杂的机体结构, 因此需多加以利用, 开展研究工作, 从而对其优越性展开进一步佐证。

2) 实现单一介质到跨介质的拓展。目前, 研究人员在从事水下枪炮发射的相关研究时, 往往仅考虑弹丸从发射到膛口的过程, 而相应的外弹道包括跨介质运动研究常被割裂开来。实际上, 在水下作战过程中, 不仅仅包含在全水下环境的射击过程, 还存在着弹丸在气-水交界面之间的跨越。因此, 在从事相关研究时, 应综合考虑弹丸的整个飞行过程, 得到全面

的研究结果, 以此提高实际作战中的射击精度和毁伤能力。

3) 发展由单弹发射向多弹发射的进一步研究。在实际应用中, 需要考虑水下枪炮多弹丸发射的情况, 包括单管连续发射和多管并联发射, 这将直接关系到水下枪炮类武器的应用范围和作战效果, 进而有效改善自身的作战能力和生存能力。在从事相关研究过程中, 不仅要考虑单一弹丸自身的飞行特性和作用效果, 还要考虑不同弹丸之间相互耦合干扰的情况, 因此研究难度也就大大提升。弄清多个弹丸发射之间流场的相互影响规律及运动特性, 对水下枪炮类武器弹道性能的提升, 有着显著的研究意义和工程应用价值。

参考文献:

- [1] 姚养无. 从水下枪械到两栖枪械的历史跨越[J]. 轻兵器, 2003(4): 8-10.
YAO Yang-wu. The Historical Leap from Underwater Gun to Amphibious Gun[J]. Small Arms, 2003(4): 8-10.
- [2] 李鸿志, 姜孝海, 王杨. 中间弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015.
LI Hong-zhi, JIANG Xiao-hai, WANG Yang. Intermediate ballistics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2015.
- [3] 杨军. 水下作战用啥枪[J]. 科学启蒙, 2013(11): 30-31.
YANG Jun. What Kind of Gun for Underwater Combat[J]. Scientific Enlightenment, 2013(11): 30-31.
- [4] 王裕安, 徐万和, 薄玉成. 自动武器构造[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1994.
WANG Yu-an, XU Wan-he, BO Yu-cheng, et al. Automatic Weapons Construction[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1994.
- [5] 孟祥宇, 侯健, 魏平, 等. 水下枪(炮)发射技术综述[J]. 兵工自动化, 2020, 39(5): 84-89.
MENG Xiang-yu, HOU Jian, WEI Ping, et al. Summary of Underwater Gun(Cannon) Launching Technology[J]. Ordnance Industry Automation, 2020, 39(5): 84-89.
- [6] 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.
ZHANG Xue-wei. Underwater Supercavitating Projectile Motion Simulation and Ballistic Characteristics Research[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
- [7] 孔德仁, 王昌明. 水下枪械内弹道分析及其理论建模[J]. 弹道学报, 1998, 10(3): 5-8.
KONG De-ren, WANG Chang-ming. Analysis of Interior Ballistic Characteristics of Underwater Gun and Theoretical Model's Establishment [J]. Journal of Ballistics, 1998, 10(3): 5-8.

- [8] STACE J J, DEAN L M, KIRSCHNER I N. Sealing Apparatus for Exclusion of Water from Underwater Gun Barrels: US5687501[P]. 1997-11-18.
- [9] FU J H, HOWARD R J, PAULIC A, et al. Underwater Gun Comprising a Turbine-Based Barrel Seal: US7832134[P]. 2010-11-16.
- [10] 刘育平, 李金新, 杨臻, 等. 水下炮内弹道分析与数值仿真[J]. 火炮发射与控制学报, 2007, 28(4): 30-33.
LIU Yu-ping, LI Jin-xin, YANG Zhen, et al. Interior Ballistics Analysis and Numerical Simulation of Underwater Gun[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2007, 28(4): 30-33.
- [11] 梅雄三, 戴劲松, 王茂森. 水下炮弹前激波特性分析[J]. 兵工自动化, 2017, 36(4): 42-44.
MEI Xiong-san, DAI Jin-song, WANG Mao-sen. Characteristic Analysis of Shock Wave before Underwater Gun[J]. Ordnance Industry Automation, 2017, 36(4): 42-44.
- [12] 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.
MEI Xiong-san. Analysis of Sealing Characteristics of Underwater Gun Muzzle[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [13] LARSON L R, TEIGLAND G L, ANDERSON N, et al. Concentric Canister Launcher[M]. US: [s. n.], 2001.
- [14] YAGLA J J. Concentric Canister Launcher[J]. Naval Engineers Journal, 1997, 109(3): 313-327.
- [15] WEILAND C J, VLACHOS P P, YAGLA J J. Concept Analysis and Laboratory Observations on a Water Piercing Missile Launcher[J]. Ocean Engineering, 2010, 37(11/12): 959-965.
- [16] 程栋, 何国强, 邢军, 等. 水下发射筒口气幕上下边界计算方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(6): 165-167.
CHENG Dong, HE Guo-qiang, XING Jun, et al. Underwater Launch Tube Outlet on the Upper and Lower Gas Screen Border Calculation Method[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(6): 165-167.
- [17] 侯金璠, 谭大成, 毕世华. 导弹水下发射装置内流场数值研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(3): 119-121.
HOU Jin-yang, TAN Da-cheng, BI Shi-hua. A Numerical Research on Interior Flow for Underwater Launched Missile[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(3): 119-121.
- [18] CAO Wei, LIU Hai-jun, WANG Cong. Research on the Effect of Head Type on the Hydrodynamics of Vertical Motion Vehicle Launched by Gas Curtain[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 310: 218-222.
- [19] 曹伟, 刘海军, 王聪. 射流速度对气幕发射方式下飞行器运动过程的影响研究[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 288-292.
CAO Wei, LIU Hai-jun, WANG Cong. The Effect of Gas Jet Speed on the Motion Process of the Underwater Vehicle Vertical Launching by Using Gas Curtain[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(9): 288-292.
- [20] 周良梁, 余永刚, 刘东尧, 等. 水下火炮气幕式发射过程中燃气射流与液体工质相互作用特性研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(8): 1373-1378.
ZHOU Liang-liang, YU Yong-gang, LIU Dong-yao, et al. Research on Gas-Liquid Interaction Characteristics during the Gas Curtain Launching Process of Underwater Gun[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(8): 1373-1378.
- [21] 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, 38(4): 954-960.
ZHOU Liang-liang, YU Yong-gang. Study of Sprayer Movement Influence on Underwater Gas-Curtain Generation Characteristics[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(4): 954-960.
- [22] ZHOU Liang-liang, YU Yong-gang. Experimental Study on Gas-Curtain Generation Characteristics by Multicomponent-Gas Jets in the Cylindrical Liquid Chamber[J]. Ocean Engineering, 2015, 109: 410-417.
- [23] ZHOU Liang-liang, YU Yong-gang, CAO Yong-jie. 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.
- [24] 张欣尉. 基于水下枪低阻发射的内弹道及多相流特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
ZHANG Xin-wei. Study on Interior Ballistics and Multiphase Flow Characteristics during the Low Resistance Launching Process of an Underwater Gun[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [25] ZHANG Xin-wei, YU Yong-gang. Experimental and Numerical Research on a Novel Underwater Launching Method with High Efficiency and Low Resistance[J]. AIP Advances, 2021, 11(2): 025212.
- [26] HU Yu-bo, YU Yong-gang, ZHANG Xin-wei. Groove Structure on the Drainage Characteristics of the Gas Curtain[J]. Ocean Engineering, 2022, 243: 110280.
- [27] 张小兵. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
ZHANG Xiao-bing. Interior ballistics of guns[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014.
- [28] 金志明, 翁春生. 高等内弹道学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
JIN Zhi-ming, WENG Chun-sheng. Advanced Interior Ballistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [29] 兰晓龙. 水下枪械发射内弹道研究[D]. 太原: 中北大

- 学, 2014.
- LAN Xiao-long. The Study on Launch Interior Ballistics of Underwater Guns[D]. Taiyuan: North University of China, 2014.
- [30] 朱斌. 与内弹道耦合的多管发射膛口非定常流场数值模拟[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- ZHU Bin. Interaction Study of Interior Ballistics Flow of Gun's Chamber and Muzzle Flowfield[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [31] 张涛, 侯健, 魏平. 水下锥膛炮内弹道方程组的推导与计算[J]. 火炮发射与控制学报, 2017, 38(4): 70-75.
- ZHANG Tao, HOU Jian, WEI Ping. Derivation and Calculation of Equation Set of Interior Ballistics of Underwater Tapered-Bore Gun[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2017, 38(4): 70-75.
- [32] 何小英, 彭雪明, 王惠军. 基于多燃气动力的水下变深度发射内弹道[J]. 弹道学报, 2019, 31(2): 14-18.
- HE Xiao-ying, PENG Xue-ming, WANG Hui-jun. Interior Ballistics of Variable-Depth Underwater Launch Based on Multi-Gas Power System[J]. Journal of Ballistics, 2019, 31(2): 14-18.
- [33] 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): 145-157.
- MENG Xiang-yu, HOU Jian, QIN Yi-ping, et al. Influence of Interior Ballistics for Underwater Guns with Gun-Bullet Coupling Gap[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(3): 145-157.
- [34] 孟祥宇, 侯健, 魏平, 等. 基于弹炮间隙的水下枪内弹道建模与实验研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2020, 41(3): 12-17.
- MENG Xiang-yu, HOU Jian, WEI Ping, et al. Modelling and Experimental Study of Interior Ballistics for Underwater Guns in View of Clearance between Projectile and Barrel[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2020, 41(3): 12-17.
- [35] 周良梁. 基于水下火炮气幕式发射的气液相互作用特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- ZHOU Liang-liang. Study on the Gas-Liquid Interaction during the Gas Episodic Launching Process of an Underwater Gun[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [36] MUÑOZ-ESPARZA D, BUCHLIN J M, MYRILLAS K, et al. Numerical Investigation of Impinging Gas Jets Onto Deformable Liquid Layers[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(6): 2687-2700.
- [37] DYMENT A, FLODRUPS J P, PAQUET J B, et al. Gaseous Cavity at the Base of an Underwater Projectile[J]. Aerospace Science and Technology, 1998, 2(8): 489-504.
- [38] HOEFELE E O, BRIMACOMBE J K. Flow Regimes in Submerged Gas Injection[J]. Metallurgical Transactions B, 1979, 10(4): 631-648.
- [39] OZAWA Y, MORI K. Effect of Physical Properties of Gas and Liquid on Bubbling-Jetting Phenomena in Gas Injection into Liquid[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1986, 26(4): 291-297.
- [40] LOTH E, FAETH G M. Structure of Underexpanded round Air Jets Submerged in Water[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1989, 15(4): 589-603.
- [41] ARGHODE V, GUPTA A. Effect of Nozzle Exit Geometry on Submerged Jet Characteristics in Underwater Propulsion[C]//46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Virginia: AIAA, 2008.
- [42] ARGHODE V K, GUPTA A K. Jet Characteristics from a Submerged Combustion System[J]. Applied Energy, 2012, 89(1): 246-253.
- [43] MEDVEDEV R N, DROZHZHIN A P, TESLENKO V S. Thrust Generation by Pulse Combustion of Gas in a Submerged Chamber[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2016, 83: 232-238.
- [44] 鲁传敬, 陈方, 樊泓, 等. 导弹水下点火的流体动力研究[J]. 航空学报, 1992, 13(4): 124-130.
- LU Chuan-jing, CHEN Fang, FAN Hong, et al. The Fluid Dynamic Research on the under-Water Ignition of Missile[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1992, 13(4): 124-130.
- [45] 戚隆溪, 曹勇, 王柏懿. 水下欠膨胀高速气体射流的实验研究[J]. 力学学报, 2000, 32(6): 667-675.
- QI Long-xi, CAO Yong, WANG Bo-yi. Experimental Study of Underexpanded Sonic Air Jets in Water[J]. Acta Mechanica Sinica, 2000, 32(6): 667-675.
- [46] CHENG Yong-sheng, LIU Hua. A Coupling Model of Water Flows and Gas Flows in Exhausted Gas Bubble on Missile Launched Underwater[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 19(4): 403-411.
- [47] 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 Long-sheng, LIU Yu, WU Zhi-feng, 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.
- [48] 胡勇, 陈鑫, 鲁传敬, 等. 水下航行体尾喷燃气与通气超空泡相互作用的研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2008, 23(4): 438-445.
- HU Yong, CHEN Xin, LU Chuan-jing, et al. Study on the Interaction between Ventilated Cavitating Flow and Exhausted Gas of an Underwater Vehicle[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics Part A, 2008, 23(4): 438-445.

- [49] 陈焕龙, 王柠, 刘华坪, 等. 不同发射深度下喷管燃气射流特性研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2012, 27(6): 659-666.
CHEN Huan-long, WANG Ning, LIU Hua-ping, et al. Investigation of Nozzle Gas Jet Characteristics with Different Launch Depth Underwater[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics Part A, 2012, 27(6): 659-666.
- [50] 许海雨, 罗凯, 黄闯, 等. 通气超空化对水下火箭发动机性能影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(6): 41-47.
XU Hai-yu, LUO Kai, HUANG Chuang, et al. Influence of Ventilated Supercavitation on Underwater Rocket Engine[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(6): 41-47.
- [51] 许海雨, 罗凯, 刘富强, 等. 水下超声速射流对上浮水雷受力特性影响研究[J]. 推进技术, 2020, 41(11): 2623-2629.
XU Hai-yu, LUO Kai, LIU Fu-qiang, et al. Effects of Underwater Supersonic Jet on Force Characteristics of Floating Mine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(11): 2623-2629.
- [52] XUE Xiao-chun, YU Yong-gang, ZHANG Qi. Study on the Effect of Distance between the Two Nozzle Holes on Interaction of High Pressure Combustion-Gas Jets with Liquid[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 85: 675-686.
- [53] 胡志涛, 余永刚. 圆柱形充液室中4股贴壁燃气射流扩展特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(4): 465-471.
HU Zhi-tao, YU Yong-gang. Experimental Study on Expansion Characteristics of Annular Four Wall Combustion-Gas Jets in a Liquid-Filled Cylindrical Chamber[J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(4): 465-471.
- [54] 胡志涛, 余永刚, 曹永杰. 多股贴壁燃气射流在圆柱型充液室中的扩展特性[J]. 含能材料, 2016, 24(2): 177-181.
HU Zhi-tao, YU Yong-gang, CAO Yong-jie. Experimental Study on Expansion Characteristics of Multiple Wall Combustion-Gas Jets in Cylindrical Filling Liquid Chamber[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(2): 177-181.
- [55] 胡志涛, 余永刚. 圆形和矩形燃气射流在受限液体中扩展特性的对比研究[J]. 推进技术, 2016, 37(9): 1638-1648.
HU Zhi-tao, YU Yong-gang. Comparative Study on Expansion Characteristics of round and Rectangular Combustion-Gas Jets in Confined Liquid Medium[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(9): 1638-1648.
- [56] 赵嘉俊. 锥形分布的多股燃气射流在柱形充液室内扩展特性的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
ZHAO Jia-jun. Study on the Expansion of Conical Distributed Multiple Gas Jets in a Cylindrical Liquid Chamber[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [57] ZHAO Jia-jun, YU Yong-gang. The Interaction between Multiple High Pressure Combustion Gas Jets and Water in a Water-Filled Vessel[J]. Applied Ocean Research, 2016, 61: 175-182.
- [58] 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, 34(7): 241-248.
ZHAO Jia-jun, YU Yong-gang. Effects of the Distribution of Lateral Orifices on Expansion of Multiple Combustion Gas Jets in Water-Filled Chamber[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(7): 241-248.
- [59] ZHOU Liang-liang, YU Yong-gang. Study on Interaction Characteristics between Multi Gas Jets and Water during the Underwater Launching Process[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 83: 200-206.
- [60] ZHOU Liang-liang, YU Yong-gang. Study on the Gas-Curtain Generation Characteristics by the Multiple Gas Jets in a Liquid-Filled Tube[J]. Applied Ocean Research, 2017, 64: 249-257.
- [61] MORETTI G. A Numerical Analysis of Muzzle Blast Precursor Flow[J]. Computers & Fluids, 1982, 10(1): 51-86.
- [62] SCHMIDT E M, GORDNIER R E, FANSLER K S. Interaction of Gun Exhaust Flowfields[J]. AIAA Journal, 1984, 22(4): 516-517.
- [63] 尤国钊, 魏琪. 膛口流场的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 1989, 9(3): 254-260.
YOU Guo-zhao, WEI Qi. Numerical Simulation of Muzzle Flowfield[J]. Explosion and Shock Waves, 1989, 9(3): 254-260.
- [64] 代淑兰, 许厚谦, 孙磊. 含动边界的膛口流场数值模拟[J]. 弹道学报, 2007, 19(3): 93-96.
DAI Shu-lan, XU Hou-qian, SUN Lei. Numerical Simulation of Gun Muzzle Flow Field Including Movable Boundary[J]. Journal of Ballistics, 2007, 19(3): 93-96.
- [65] 代淑兰, 许厚谦, 王兵. 含高速运动弹丸的膛口二次燃烧并行数值模拟[J]. 弹道学报, 2009, 21(1): 83-86.
DAI Shu-lan, XU Hou-qian, WANG Bing. Numerical Simulation of Secondary Muzzle Flash Including High-Speed Projectile Using Parallel Computation Method[J]. Journal of Ballistics, 2009, 21(1): 83-86.
- [66] 江坤, 王浩. 基于动网格技术的膛口流场数值模拟[J]. 火炮发射与控制学报, 2010, 31(3): 1-4.
JIANG Kun, WANG Hao. Numerical Simulation of Muzzle Flow Field Based on Dynamic Meshing Technique[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2010, 31(3):

- 1-4.
- [67] 蔡涛. 水下发射膛口多相流场分析[D]. 太原: 中北大学, 2020.
CAI Tao. Muzzle Multiphase Flow Field Analysis of Underwater Launching[D]. Taiyuan: North University of China, 2020.
- [68] 张欣尉, 余永刚, 莽珊珊. 装药参数对水下机枪密封式膛口流场影响的数值分析[J]. 兵工学报, 2018, 39(1): 18-27.
ZHANG Xin-wei, YU Yong-gang, MANG Shan-shan. Numerical Analysis of Influence of Charge Parameters on Flow Field around Sealed Muzzle of Underwater Machine Gun[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(1): 18-27.
- [69] 张旋, 余永刚, 张欣尉. 枪口压力对水下发射膛口流场特性的影响[J]. 弹道学报, 2021, 33(3): 37-43.
ZHANG Xuan, YU Yong-gang, ZHANG Xin-wei. Influence of Muzzle Pressure on Muzzle Flow Field Characteristics of Underwater Launching[J]. Journal of Ballistics, 2021, 33(3): 37-43.
- [70] 张京辉, 余永刚. 弹道枪不同水深下全淹没式发射膛口流场的数值分析[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(10): 97-109.
ZHANG Jing-hui, YU Yong-gang. Numerical Investigation on the Muzzle Flow Field of an Underwater Submerged Launched Ballistic Gun at Different Water Depths[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(10): 97-109.
- [71] 张京辉, 余永刚. 弹道枪水下全淹没式发射膛口流场演化特性的数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2020, 41(3): 471-480.
ZHANG Jing-hui, YU Yong-gang. Numerical Investigation on Evolutionary Characteristics of Muzzle Flow Field of Ballistic Gun during Underwater Submerged Firing[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(3): 471-480.
- [72] ZHANG Jing-hui, YU Yong-gang, ZHANG Xin-wei. Numerical Investigation of a Muzzle Multiphase Flow Field Using Two Underwater Launch Methods[J/OL]. Defence Technology, 2021-09-24. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2021.09.015>.
- [73] 张旋. 弹道枪水下发射膛口流场特性研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
ZHANG Xuan. Study on Flow Field Characteristics of Ballistic Gun Underwater Launch Muzzle[D]. Taiyuan: North University of China, 2020.
- [74] ZHANG Xin-wei, YU Yong-gang, ZHOU Liang-liang. Numerical Study on the Multiphase Flow Characteristics of Gas Curtain Launch for Underwater Gun[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 134: 250-261.
- [75] 张旋, 余永刚, 张欣尉. 火炮在不同介质中发射的膛口流场特性分析[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(10): 103-114.
ZHANG Xuan, YU Yong-gang, ZHANG Xin-wei. Analysis of Muzzle Flow Field Characteristics of Gun Fired in Different Media[J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(10): 103-114.

责任编辑: 刘世忠