

doi: 10.7690/bgzdh.2020.05.020

水下枪(炮)发射技术综述

孟祥宇, 侯健, 魏平, 廖斐

(海军工程大学兵器工程学院, 武汉 430000)

摘要: 针对现超空泡射弹发射技术的研究成果难以支撑其工程应用的问题, 对水下枪炮发射技术进行探讨。介绍国内外鱼雷及导弹水下发射技术, 对水下枪炮自动机进行分类, 归纳水下枪炮发射的关键技术, 总结超空泡射弹武器系统数值计算和实验研究成果, 对水下枪炮发射技术的研究现状进行分析, 并从水下射弹测速和水下自动机膛压测试技术方面展望了水下枪炮发射技术领域的研究方向。该研究有一定的实用参考价值。

关键词: 水下枪炮; 水下发射技术; 超空泡; 综述

中图分类号: TJ301 **文献标志码:** A

Summary of Underwater Gun (Cannon) Launching Technology

Meng Xiangyu, Hou Jian, Wei Ping, Liao Fei

(College of Weapons Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430000, China)

Abstract: The research results of the current supercavitation projectile launching technology are difficult to support the engineering application. Therefore underwater gun launching technology is discussed. This paper summarizes the underwater launching technology of torpedoes and missiles at home and abroad. By introducing the classification of underwater gun automata, concluding the key technologies of underwater gun launching and summarizing the numerical calculation and experimental research results of supercavitation projectile weapon system, the research status of underwater gun launching technology is analyzed. Finally, from the aspects of underwater projectile velocity and barrel pressure measurement technology, the research direction of underwater gun launch technology is prospected. This research has certain practical reference value.

Keywords: underwater gun; underwater launch technology; supercavitation; summary

0 引言

随着技术的发展, 超空泡技术为枪炮武器参与水下主动攻防提供了技术发展的新思路。这是一种可以使水下高速运动航行体获得 90% 减阻量的革命性减阻方法, 使枪炮射弹能够在水下高速、稳定地航行, 突破常规射弹水中运动极限, 从而增加射弹的行程和杀伤力^[1-4]。与传统水中兵器相比, 超空泡射弹武器系统具有多用途、机动灵活、响应快、携弹量大、持续作战能力强等特点, 可以为舰(潜)艇提供有效的防御能力。

超空泡射弹武器系统的高初速、强稳定性以及水下环境的特殊性为水下枪(炮)发射技术提出了更多要求。超空泡射弹技术研究在国内外是一大热点, 尚有许多理论、数值模拟以及实验等方面的难题需要解决。目前, 超空泡射弹技术主要是基于弹体形态设计、入水稳定性以及入水后空泡形态的研究, 对超空泡射弹发射技术的研究相对较少, 研究成果难以支撑超空泡射弹发射工程应用^[5-6], 还需针对水

下射弹减阻增程技术、水下枪(炮)流体减阻、微后座力技术以及水下枪(炮)轻量化和新材料应用技术等关键技术进行研究。

1 相关武器水下发射技术概况

现有水下武器主要包括鱼雷、导弹和水雷等。这些常规水下武器的发射技术随着研究的深入与实战的应用逐渐成熟, 对超空泡射弹发射技术有一定的借鉴和指导意义。

1.1 鱼雷发射技术

现有鱼雷主要使用鱼雷发射管发射, 发射装置采用的发射方式主要有 4 种: 1) 液压活塞式; 2) 空气涡轮泵式; 3) 自航式; 4) 弹射式。

液压活塞式可靠性高、发射深度不受潜艇深度限制, 主要缺点是武器发射时瞬态噪声较大、设备自身较笨重、发射周期较长、使用费用较高、安装与维修比较困难等。

空气涡轮泵式发射方式类似于传统的气动发射

收稿日期: 2020-01-16; 修回日期: 2020-03-13

作者简介: 孟祥宇(1995—), 男, 山东人, 硕士, 从事兵器发射与动力推进技术研究。E-mail: 1572981686@qq.com。

方式或液压平衡发射方式,会产生很大瞬态发射噪声,但该方式发射初速较高,能在较短时间内完成发射或攻击目标。

自航式发射方式是指鱼雷在发射管内启动发动机,依靠自身动力航行出管,优点是噪声小、隐蔽性强,但发射速度及航速受限,反应能力较弱。

弹射式发射方式通过作用于鱼雷上的弹性力量快速释放,使鱼雷具有较高的发射初速,且噪声较小,具有较好的隐蔽性。

1.2 潜射导弹发射技术

潜射导弹命中精度高、突防能力强,结合潜艇的隐蔽性,更能提高潜艇攻击的突然性和打击效果^[7]。从 20 世纪 50 年代至今,潜射导弹发射方式已发展出多种类型。按发射筒轴线布置方向划分,可分为水平发射、垂直(包括倾斜)发射^[8]。

采用水平发射方式一般利用潜艇原有鱼雷管发射导弹,根据导弹直径选择是否使用运载器,直径较小时采用水密运载器以适应鱼雷发射管发射,其中水密运载器分有动力和无动力 2 种。当导弹直径增加不适应运载器时采用裸式发射,有利于提高导弹射程,增加鱼雷管利用率。

垂直发射(包括倾斜发射)一般不采用运载器发射方案,而采用有动力湿式或干式发射。难点是水下点火问题,通常使用燃气蒸汽弹射发射,水面点火的发射方式。

分析水下导弹发射方式的发展历程可以发现,垂直发射是水下发射战术导弹的发展方向,与水平发射相比有许多优点:导弹水下航行的时间和航程较短,出水弹道简单,容易控制;导弹发射无盲区,可以全方位打击目标;贮弹量大且齐射时间间隔短,火力猛,更能适应现代战争的要求。

对于水下发射技术,无论鱼雷或是导弹亦或是超空泡射弹武器系统,由于水的密度是空气的 800 倍,在水下发射时,都面临水附加质量的影响。对于相对成熟的鱼雷和水下导弹发射技术,水下枪(炮)发射技术可以借鉴的方面有:

1) 水下枪(炮)发射时将炮口密封,将水隔绝在身管之外,从而在发射时排除弹前水柱附加质量的影响;

2) 水下枪(炮)对身管进行特殊设计,借鉴水下导弹同心筒发射装置,利用火药燃气实现实时排除附加质量;

3) 将水下枪(炮)搭载于无人潜航器,以弥补水

下枪(炮)射程不足的缺点。

2 水下枪炮发射技术研究现状

2.1 水下枪(炮)自动机分类

水下枪(炮)自动机是水下枪(炮)射击时,利用火药燃气或外部能源自动连续射击各机构的总称。要求机构在水下环境下能自动完成击发、收回击针、开锁、开闩、抽筒、抛筒、供弹、输弹、关闩和闭锁等动作。水下枪(炮)自动机从工作原理讲,包括炮身、炮闩、供弹和输弹机构、反后坐装置及缓冲装置、发射机构、保险机构等。

根据自动机利用不同能量和结构的特点,可以将枪炮自动机分为利用后坐能量的后坐式自动机、利用导出火药燃气的导气式和转膛式自动机、利用外能源的转管式和链式自动机等。然而由于水下环境的特殊性,转膛式以及转管式自动机受水阻力影响较大,水下发射时机构运动可靠性较低。目前,水下枪(炮)自动机主要采用导气式、后坐式以及外能源自动机。

水下突击步枪和两栖突击步枪主要装备于蛙人部队,使用水深较浅,水阻力随水深变化不明显;因此,水下枪普遍采用导气式自动机,如前苏联研制的 APS 水下突击步枪以及现俄罗斯使用的 ASM-DT 两栖突击步枪与 ADS 两栖突击步枪^[9]。

后坐式自动机由于后坐能量受水阻力削弱,一般放置于舰、潜艇舱体内部,具有整体密封于舱体内和炮口置于水中 2 种形式。自动机整体密封在舱体内的结构在发射前需对密封舱加高压空气,当压力达到一定值后,水下自动机炮口前方的密封舱盖方可打开,此时,自动机可以发射。但停止射击后需要卸压,且维修与再装填操作较为繁琐。炮口置于水中结构的自动机后部在密封的舱体内,炮口伸出吊舱外侧,与海水接触。火炮射击时,身管与吊舱之间沿身管方向前后运动,需要对两者运动部位进行动态密封。较为流行采用球阀结构密封炮口。该种结构形式对密封的要求相当高,且不利于自动机相对于母体的目标独立瞄准。

当水下枪(炮)需要跨不同深度进行射击时,由于水深度变化较大,故导气式和后坐式在不同深度的水下射频及机构动作可靠性难以保证,通常使用外能源方式驱动自动机工作,根据不同深度处的压力,自动赋予能量供给,更适合装备于无人潜器的水下枪(炮)自动机。该种自动机可以布置在舰、潜艇外,暴露于水中,不需对舱体进行挖孔安装,只

需在舱体外侧加装安装支座。水下自动机的各运动零部件完全与水接触,缺点是射击时阻力较大,且对材料防腐性有较高要求;优点是能有效解决自动机个体对目标的自动修正,在设计上独立性强,易于实现。

水下枪(炮)自动机的选择,应从威力、射程、机动性、可靠性和经济性等战技指标要求进行分析,从而选择合适的水下枪(炮)自动机。

2.2 水下枪(炮)发射关键技术

枪炮置于水下发射受水环境影响较大,自动机的设计与水面枪炮武器存在一定差异。主要的影响因素包括 2 个方面:1) 水的密度约是干燥空气的 800 倍,水的黏性阻力会极大缩短弹头的射击距离,降低弹头的飞行稳定性,并且对炮箱内部件的运动特性造成较大影响;2) 身管中会灌满水,当水下枪(炮)自动或半自动射击时,会急剧增大身管内火药气体的压力,加大自动机的动能。水下射击必须研制专门的自动机和弹药。

2.2.1 水下自动机结构设计

2.2.1.1 水下自动机身管设计

水下枪(炮)身管一般采用滑膛身管设计。普通射弹在空中通过高速旋转使弹体具有进动性和空间定向性,保证弹体直线运动对抗重力、阻力和地心偏向力的影响,提高精度。而水下发射时由于弹体自转与攻角影响会产生马格努斯效应,大大影响射弹稳定性^[10]。

$$\omega_w = \sqrt{\frac{1000}{1.206}} \times \omega_x \approx 28.8\omega_x。$$

王泽宇等^[11]通过对旋转超空泡射弹流体动力特性进行研究,发现超空泡射弹在水介质中航行的稳定旋转角速度是空气中稳定飞行所需旋转角速度近 29 倍,导致膛线使弹丸产生旋转难度过大,通过旋转很难实现射弹稳定;因此,选择滑膛身管发射超空泡射弹更为合适。侯健等^[12-13]在滑膛炮基础上引入锥膛身管发射次口径水下射弹,从而提高射弹初速,通过理论分析和实验证明了其可行性。

在设计水下枪(炮)身管时,还应考虑弹炮间隙配合的影响。1991 年,俄罗斯炮兵工程学院研制的 ASM-DT 两栖突击步枪枪管,虽使用线膛,但充分结合了滑膛的优点,将水下射弹弹丸直径改为枪管阳线直径,从而在发射水下弹时,少量火药燃气会通过膛线与弹丸之间的缝隙从弹头前喷出,卸载弹

前载荷,避免弹前水柱带来的附加质量使膛压升高出现炸膛意外。

2.2.1.2 水下自动机炮闩结构设计

水下枪(炮)自动机炮闩与陆上枪炮自动机存在差异,在水下射击时:一方面,由于机匣内会灌入海水,使阻力增大,常规的击锤击发方式会因水的阻力问题而导致击发无力^[14];另一方面,由于水下弹丸长度较长,枪机要完成推弹入膛的动作,后坐行程相当于普通步枪的 3 倍,机匣空间有限,无法容纳硕大的击锤,即水下射弹发射时无法使用回转式击锤,而应采用自动机开膛待机,炮闩兼做击锤的击发方式。

2.2.1.3 水下自动机供弹机构设计

水下自动机供弹机构是自动机重新填装的主要部件,应满足水下枪(炮)自动机射击频率,实施不间断供弹,重点是提高进弹的可靠性与及时性,关键技术是大容量弹箱最小供弹阻力技术^[15]。不同水深条件压力不同,火药能力推弹可靠性差,现阶段国内一般使用弹夹或弹鼓将弹直接送进弹口的方式。

2.2.1.4 水下自动机炮箱设计

炮箱是自动机的基础构件,为其他零部件提供安装位置。水下自动机炮箱为了降低内部运动部件的阻力,需要在炮箱侧壁开排水口。避免形成大阻尼结构。

2.2.2 水下枪(炮)发射方式及其内弹道

超空泡射弹武器系统内弹道属于变质量变容积的热力学过程,由于水介质的特殊性,水下射弹武器的内弹道特性与常规空气中发射时既有相同点,又有许多不同的地方。现阶段超空泡枪炮发射方式主要有密封式和全水下式 2 种。

2.2.2.1 密封式

Stace 和 Fu 等^[16-17]提出了水下密封式发射装置。密封式发射方式是使用特制挡水装置将水阻隔在炮口外使内弹道过程与空气中一致的发射方式。对于水下枪(炮)发射技术,身管的良好密封性能可以防止大量海水进入,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,并减少海水对身管的腐蚀^[18]。该发射方式在射击中断后会产生液体回流,需要排出身管内海水,再次密封炮口,结构复杂。图 1 为密封发射方式物理模型。

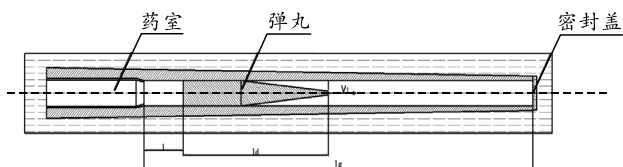


图1 密封发射方式物理模型

在采用密封式发射装置时，由于密封盖封闭炮口，且射弹在膛内运动的大部分距离速度均大于弹前空气的音速；因此，弹前空气会产生激波。刘育平等^[19]针对水下炮密封式发射过程进行了数值计算，捕捉到弹前激波，并且得到弹前激波会增大膛压，减小射弹初速的结论。梅雄三等^[20]利用流场仿真得到的关键参数进行密封机构的设计，对炮口密封装置进行改进，并运用多刚体动力学理论，在Adams中建立加装密封机构后的仿真模型，验证了密封装置的可行性。

2.2.2.2 全水下式

全水下式发射方式是将超空泡枪炮完全置于水中，炮口处无密封装置，弹丸发射时，药室中的火药点燃后，火药燃气需要推动弹丸以及弹前水柱一起向炮口运动。原理如图2所示。

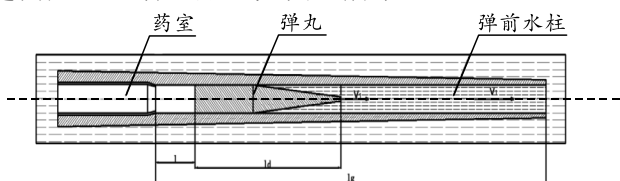


图2 全水下式发射方式物理模型

由于水的黏性系数和密度均比空气大很多，弹前水柱对弹丸的运动影响不能忽略，对于全水下式超空泡枪炮而言，除研究弹丸的内弹道过程外，还必须对弹丸前方的水柱进行研究^[21-22]。1998年，孔德仁等^[23]研究了水下枪械内弹道特性，简述了水下枪械发射技术的特点，建立了全水下非导气内弹道模型，以“弹丸和管内水柱”为受力体，建立了适合于水下枪械内弹道计算的理论模型，并进行了数值模拟计算及实验验证。

王昌明等^[24]又分别针对后效期和水深对水下枪械内弹道模型进行了改进。现阶段全水下式发射模式内弹道大部分研究视弹炮耦合不存在间隙，这种全水下式发射模式虽然结构简单，但由于弹前载荷(即弹前水柱附加质量)射弹发射阻力较大，膛压较高，为了保证安全，弹丸初速往往较低。

1991年，俄罗斯炮兵工程学院将研制的ASM-DT水下步枪引入弹炮间隙，在配合解决水陆

两用弹型匹配问题的同时，优化了全水下发射方式高膛压、低初速的缺陷。这是由于发射时，部分火药燃气会通过间隙推动弹前水柱加速排出炮口，从而消除弹前水柱附加质量的不良影响。图3为全水下方式弹炮配合带间隙时的发射原理，相对于空气中发射，全水下发射内弹道需要考虑水柱出膛口时的动压力、膛口处静水压力、水与身管摩擦阻力以及过间隙气体流出量等的影响。

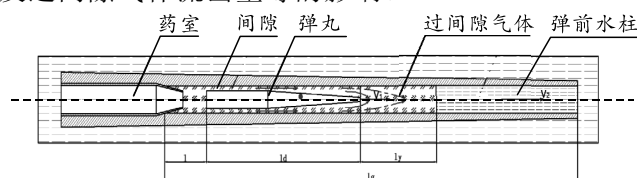


图3 全水下发射带间隙物理模型

水下枪(炮)导气排水过程，是一种高速气体射流与液体两相相互作用的结果。国内外对该方式的研究较少，但对气体射流与液体相互作用的研究较多。Helmholtz、Tayleigh和Kelvin等^[25-27]研究了气体射流的非稳定性理论，给出非稳定性数学模型以及控制方程。Weiland等^[28]采用摄像技术，研究了圆形射流入水过程中气体与液体边界动力学特性和气体与液体作用稳定性的关系。施红辉等^[29]对单股水下超声速燃气射流水下扩展过程进行了探讨。薛晓春等^[30]采用高速摄像技术，对双股燃气射流在充液室中的扩展特性进行了实验观测，并对观察室边界形状对气体射流扩展的影响进行对比分析。赵嘉俊^[31]、周良梁等^[32]基于弹炮耦合带间隙的发射原理，设计了可视化模拟实验装置，研究了弹丸运动过程中气幕生成特性，采用实验和数值模拟相结合的方法，分析了超空泡射弹全水下发射方式气体与液体相互作用特性。

水下枪(炮)全水下发射引入弹炮间隙时能够大幅度减小弹丸运动阻力，有效地减小膛压并提升射弹速度。

2.3 水下枪(炮)发射技术实验研究现状

实验研究是揭示任何物理现象本质的最基本与最重要的手段，超空泡射弹的研究也不例外。20世纪五六十年代至今，国内外对水下超空泡技术进行了大量实验，但针对超空泡射弹入水问题、跳弹问题、水下弹道及射弹运动稳定性问题的实验较多^[33-37]，而针对超空泡射弹发射技术以及内弹道的实验研究相对较少。这方面相关实验主要包括水下自动机运动测试实验、超空泡射弹运动参数测试实验、水下发射冲击波测试实验、火药燃气压力测试

实验、后座能量测试实验等。

2.3.1 水下射弹测速技术研究现状

弹丸速度测量方法主要包括声靶测速、线圈靶测速、天幕靶、高速摄影、通断靶测速、线阵、光电靶测速等,而水下测量装置与空气中有很大区别。超空泡射弹速度测试与常规弹丸测速主要的不同点有 2 方面: 1) 测试环境介质为水介质,通断靶测速方法效果不佳,存在持续导通现象,要求测速设备有良好的绝缘性; 2) 水下射弹依靠超空泡进行减阻,使用接触式测速方法会导致空泡快速溃灭,因此,需要使用非接触式测速方法。现阶段,非接触式测速中用于水下射弹测速效果较好的方法是线圈靶测速、光幕靶测速和高速摄影测速方法^[38-39]。

美国海军弹道实验室曾有关于运用线圈靶进行水下运动体测速的研究简报,但如何实施等关键技术一直处于保密状态^[40]。南京理工大学秦会国等^[41]对弹丸水下运动速度测量方法进行了研究与分析,研制了防水型线圈靶,建立了线圈靶的电磁偶极子模型,提出了以线圈靶的感应电动势的过零点作为表征弹丸过靶信号的特征点的结论。章启成^[42]、李涛^[43]对多种光源的特性进行了分析、测试和比对,基于激光光源的平行光系统及硅光电池集成器件,设计了水下光幕测速传感器,并将其用于水下弹丸速度测试的前端区截装置,验证了水下光幕测速的可行性。

2.3.2 水下自动机膛压测试技术研究现状

膛压的测定是检测水下自动机强度的重要技术指标,是自动机设计、研制过程中必须大量实验和测量分析的重要动态参数。空气中通常使用的动态测压方法包括压电法和应变法^[44],应变式测压系统性能相对稳定,对环境要求较低,使用和维护比较方便,但是系统的频响特性相对较差;压电测压法具有固有频率高、灵敏度高和工作温度范围较宽等特点,但对环境和绝缘性要求较高。

近年来,国内学者对水下膛压测量进行了大量理论仿真研究,中北大学张瑜等^[45]对传压管道频响特性进行了数值模拟,分析了传压管道的几何参数以及传压介质中气体占有率对管道固有频率的影响。指出在传压管道采用典型的无空腔管道系统,管道中必须填充硅脂以提高传感器抗热冲击能力、减少温度对测量精度的影响、提高测试系统的频率特性。

南京理工大学的狄长安等^[46]给出一种适用于水下发射装置膛压测量的应变式测量系统的工作原理及组成,讨论了水中动态压力测量中的管道效应问题,提出了水中压力测量的注意事项。

2.3.3 水下自动机运动测量技术研究现状

自动机是水下突击步枪的心脏部件,活动件的性能及工作状态,不仅关系到水下枪(炮)的整体性能,而且关系到其有无故障,能否使用等。自动机运动参数的测量对于水下枪械的分析、改进、研制等具有极为重要的意义。由于水环境的特殊性,且自动机在运动过程中受各种因素的影响,常规的测速方法无法满足要求,故一般采用磁电式感应测速传感器,对自动机速度变化进行测试。

南京理工大学王昌明等^[47]给出一种适用于水下自动机运动测量的系统。该测量系统由永磁型感应测速传感器、测量放大器、BC-10N20 型瞬态波形存储器和微机组成。运用该系统对水下枪械活动件的运动情况进行了分析。

鲁刚等^[48]针对自动机陆上和水中 2 种工作状态,设计了一种自动机运动模拟装置,并组建了一套自动机参数测试分析系统,通过实验得到了陆上及水下不同状态的自动机运动参数,为两栖武器及水下武器的自动机设计提供了参考。

陈静等^[49]利用感应测速传感器进行水下自动机运动特性测试,得到了相应的实验数据,并对实验现象进行了分析,总结了自动机运动特性测试的关键问题,指出绝缘问题和导轨间隙问题会对实验产生较大影响。

3 结束语

超空泡射弹水下枪炮武器的军事应用前景十分可观,随着基础理论的加强、传统思维定势的突破,关键技术的不断创新,超空泡射弹的水下发射技术将得到极大的改善,突防打击能力与续航能力极大增强,必将实现枪炮武器水下作战跨越式发展,对未来水下近程防御作战方式和装备发展产生革命性作用。

参考文献:

- [1] 吴锐,朱清浩,刘亚林. 浅析超空泡水中兵器的发展现状与趋势[J]. 中国科技纵横, 2009(11): 282-283.
- [2] 金大桥,王聪,余锋. 水下超空泡射弹研究综述[J]. 飞航导弹, 2010(7): 19-23.
- [3] 魏平,侯健,杨柯. 超空泡射弹研究综述[J]. 舰船电子

- 工程, 2008, 28(4): 13-17.
- [4] 严平, 刘亭, 康德. 超空泡射弹对水雷侵彻的数值模拟[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(8): 1-5.
- [5] 姚忠, 玉瑞, 徐保成. 超空泡射弹火炮武器应用现状研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2017(3): 92-96.
- [6] 郭建明. 超空泡小比例射弹数值模拟及试验[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [7] 王军延, 王宝和, 宋杰. 美国潜射弹道导弹发展历程研究与启示[J]. 现代防御技术, 2016, 44(5): 1-7.
- [8] 杨志宏, 李志阔. 巡航导弹水下发射技术综述[J]. 飞航导弹, 2013(6): 37-38.
- [9] 鲁刚. 两栖轻型武器系统设计与试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [10] 赵博博, 刘荣忠, 郭锐. 扭曲尾翼弹箭的马格努斯数值研究[J]. 固体火箭技术, 2015(4): 465-471.
- [11] 王泽宇. 旋转超空泡射弹流体动力特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [12] 侯健, 魏平, 李金新. 锥膛炮内弹道建模与仿真计算[J]. 兵工学报, 2010, 31(4): 419-422.
- [13] 魏平, 侯健, 陈汀峰, 等. 基于锥膛炮的弹丸弹膛内阻力研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(3): 324-328.
- [14] 张龙, 王昌明. 水下枪发射机构的运动与动力特性研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2004, 28(6): 575-579.
- [15] 谭仲于, 吴光宁, 吴其军. 大容量弹箱设计分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2011(3): 52-55.
- [16] STACE J J, DEAN L M, KIRSCHNER I N. Sealing apparatus for exclusion of water from underwater gun barrels[Z]. 1997.
- [17] FU J. Underwater gun comprising a turbine-based barrel seal[Z]. 2010.
- [18] 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.
- [19] 刘育平, 李金新, 杨臻. 水下炮内弹道分析与数值仿真[J]. 火炮发射与控制学报, 2007(4): 30-33.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 王昌明, 陈(舟捷), 柳光辽, 等. 相关分析在水下枪械内弹道计算中的应用[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2005(3): 260-263.
- [23] 孔德仁, 王昌明, 柳光辽, 等. 水下枪械内弹道基本方程组及其设计[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 1999, 23(3): 9-12.
- [24] 王昌明, 孔德仁, 狄长安, 等. 水下枪械弹道特性研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2003, 27(5): 583-587.
- [25] PROFESSOR H. XLIII. On discontinuous movements of fluids[J]. Philosophical Magazine, 1977, 36(244): 337-346.
- [26] SIRWILLIAMTHOMSON F R S. XLVI. Hydrokinetic solutions and observations[J]. Philosophical Magazine Series 1, 1871, 42(281): 16.
- [27] RAYLEIGH L. On The Instability Of Jets[J]. Proceedings of the London Mathematical Society, s1-10(1).
- [28] 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.
- [29] 施红辉, 汪剑锋, 陈帅, 等. 水下超声速气体射流初期流场特性的实验研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(3): 233-237.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 周良梁, 余永刚, 刘东尧. 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.
- [33] 施红辉, 周东辉, 孙亚亚. 水下连发射弹的超空泡流动特性研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(11): 2228-2235.
- [34] 王瑞, 党建军, 姚忠. 超空泡射弹尾翼流体动力特性实验分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(10): 137-142.
- [35] 周梦笛, 曹从咏, 盛楚倩. 基于6DOF的高速射弹入水超空泡特性研究[J/OL]. 火炮发射与控制学报: 1-5[2019-04-28].
- [36] 陈晨, 魏英杰, 王聪, 等. 射弹跨声速入水初期阶段多相流场特性数值研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(6): 46-53, 61.
- [37] 施红辉, 周素云, 王昀, 等. 攻角变化超空泡射弹冲击水面的流体物理现象研究[J]. 弹道学报, 2019, 31(1): 68-74.
- [38] 李盘文. 水下高速航行体的测速技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [39] 狄长安, 沈勇, 王昌明, 等. 传感器技术在水下枪弹速度测量中的应用[J]. 传感器与微系统, 2002, 21(1): 54-56.
- [40] HRUBES J D. High-speed imaging of supercavitating underwater projectiles[J]. Experiments in Fluids, 2001, 30(1): 57-64.
- [41] 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.

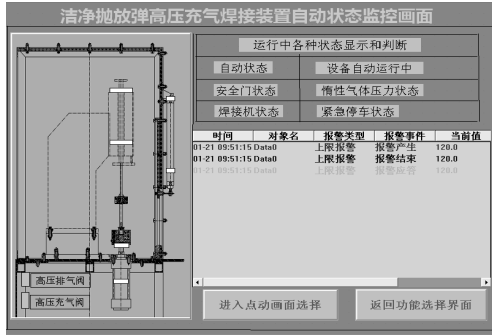


图 14 自动操作画面

4) 实时监控高压充气的过程与焊接自动化相结合。实时监控高压充气过程的画面如图 15 所示。

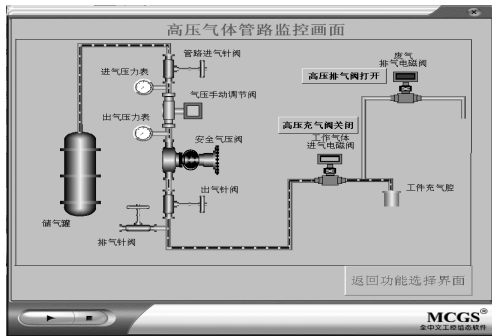


图 15 高压充气过程监控画面

5) 安全保障。热压焊接是瞬时大电流设备，保障安全是第一，所以焊接器上设有过电流检测功能、

无通电检测功能、温度异常检测功能和自我诊断功能等，确保焊接过程的安全性。

MM-370B 检测的电流信号、熔深的位移等反馈给焊接控制器，控制器计算和处理后的信号控制焊接，确保焊接时火工品的状态不发生变化。

5 结束语

笔者通过对装有易燃易爆药剂的封闭容腔内充入高压气体，并实现自动焊接的工艺进行研究，不但解决了洁净抛防弹高压充气焊接的工艺瓶颈，而且研制出了操作简单、安全可靠、快速高效的自动化生产设备。

参考文献:

[1] 玄立伟, 陈超波, 张彬彬, 等. 基于超级电容充放电的火工品启爆仪[J]. 兵工自动化, 2018, 37(6): 18-22.

[2] S7-200PLC 应用基础与实例[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2007: 1-5.

[3] 朱启明. 机械加工工艺手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 10-185.

[4] 蒋良荳, 刘濛, 王逸鸣. 创新设计在机械结构设计中的应用研究[J]. 兵工自动化, 2019, 38(7): 41-42.

[5] 杨吉林, 田晓丽, 乔茹斐, 等. 焊接钢质药筒力学特性分析研究[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(4): 61-66.

[6] *****

[46] 狄长安, 孔德仁, 王昌明, 等. 水下发射装置膛压测量方法探讨[J]. 仪器仪表学报, 2002(z1): 18-19.

[47] 王昌明, 沈勇, 赵治栋, 等. 水下枪械活动件运动分析[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2002, 26(02): 123-126.

[48] 鲁刚, 何云峰, 王昭, 等. 自动机运动模拟装置设计及试验分析[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2012, 36(5): 810-813.

[49] 陈静. 水下压力与速度测试研究[J]. 探测与控制学报, 2006, 28(2): 13-15.

(上接第 89 页)

[42] 章启成. 水下高速运动体运动特性分析与试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.

[43] 李涛. 基于大靶面光幕靶的数据采集与传输技术[D]. 太原: 中北大学, 2018.

[44] 陈静. 水下压力与速度测试研究[J]. 探测与控制学报, 2006, 28(2): 13-15.

[45] 张瑜, 张红艳, 祖静. 武器膛压测试系统传压管道的频率响应特性分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2012(4): 83-86.