

# 水下垂直发射筒口压力波动特性分析

赵志敏, 吴训涛, 覃东升

(中国人民解放军91550部队91分队, 辽宁大连116023)

**摘要:**筒口压力场的波动特性对于发射装置的设计和飞行器水下点火时机的选择至关重要。通过CFD仿真计算和试验结果分析,给出了筒口压力波形,归纳出了压力波动的量值模型。研究表明,飞行器出筒后筒口压力出现第一个峰值,经历了一个脉宽大约为峰值脉宽2倍的波谷后,达到第二个峰值,之后以较为稳定的频率波动,波动幅值近似以指数规律迅速衰减。从第二个波峰开始,压力波可以用有阻尼的振动方程近似表示;波动频率随流场欧拉数的增大而增大,与欧拉数的倒数近似成线性关系,可为飞行器的水下发射设计提供参考。

**关键词:**水下发射;筒口压力;波动特性

**本文引用格式:**赵志敏,吴训涛,覃东升.水下垂直发射筒口压力波动特性分析[J].兵器装备工程学报,2017(10):5-8.

**Citation format:**ZHAO Zhimin, WU Xuntao, QIN Dongsheng. Analysis on the Characteristics of Pressure Wave Near Tube for Underwater Vertical Launch[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017(10):5-8.

中图分类号:TJ762.4

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2017)10-0005-04

## Analysis on the Characteristics of Pressure Wave Near Tube for Underwater Vertical Launch

ZHAO Zhimin, WU Xuntao, QIN Dongsheng

(Unit 91 of the No. 91550<sup>th</sup> Troop of PLA, Dalian 116023, China)

**Abstract:** The pressure field near the tube has great influence on the underwater launching. The CFD simulation and test results analysis were employed to investigate the propagation characteristics of the pressure near the tube. The wave form of the pressure was obtained, the quantity model of the pressure fluctuations and the relationship with the Euler number were generalized. The results shows that, the first peak value of the pressure appears as the vehicle moves away from the tube, and after a wave valley continuing for about two times of the wave peak pulse width, the second peak value arises, and then the pressure fluctuates regularly at certain frequency. Meanwhile, the wave amplitudes damps exponentially. The damping vibration equation can be used to approximate the pressure wave movement process after the second wave peak. The pressure fluctuation frequency grows as the Euler number increases, which is close to linear relationship within certain range.

**Key words:** underwater launch; pressure field near tube; characteristics of pressure wave

飞行器水下垂直发射过程中,由高温高压的燃气-水汽工质弹射出筒,经历水下段的运动后出水。在此过程中,飞行器周围是复杂的多相介质的非定常流动<sup>[1-2]</sup>,在筒口附近产生量值较大、变化急剧的压力场。该压力场一方面作用于飞行器,影响其周围空泡的发展,使飞行器的弹道、载荷与力

学环境发生变化<sup>[3]</sup>;另一方面作用于发射平台及发射装置部件。压力载荷对筒盖及周围发射平台结构具有较强的破坏作用<sup>[4]</sup>,影响后续发射。因此,摸清筒口压力场的变化规律对于飞行器水下发射设计至关重要。近年来学者们对水下发射的筒口气泡特性和筒口压力场开展了研究<sup>[4-11]</sup>,这些

研究主要采用 CFD 软件进行仿真计算,得出筒口压力的量值,给出仿真波形,定性分析筒口气泡拉断、膨胀 - 压缩的变化过程及其引起的筒口压力变化特征。文献[4-8]基于有相变或无相变的 VOF 多相流模型,采用动网格技术仿真分析,获取了作用在筒盖上的压力特性,指出了压力脉动与燃气气泡发展变化的关系,这些研究重点关注筒盖的载荷。文献[9-10]利用 FLUENT 软件采用多相流模型研究了弹尾出筒后筒口气泡的发展规律,阐述了筒口气泡变化对压力脉动的影响。文献[11]运用动网格技术和 UDF 技术并结合多相流模型,研究了流场结构的变化以及水动力特性对流场的响应。

本文采用仿真计算和试验相结合的方法,得到更为准确、筒口压力波形,在此基础上对筒口压力的波动特性进行分析,给出压力波动量值的拟合模型及波动频率与流场欧拉数、出筒速度、发射深度的关系模型公式,对压力的波动特性给出定量描述,指出了压力波动与发射深度和出筒速度的关系。

## 1 筒口压力场分析途径

对筒口压力场的分析,目前常采用两种手段:其一是数值模拟计算,其二是水下发射试验。水下发射试验最为直接,也是必不可少的,通过试验可以验证和修理论分析、仿真分析和模拟计算的结果。然而由于试验成本、条件等因素的限制,对于较大尺寸的飞行器,全尺度试验只能在有限的工况下进行,试验样本量有限。随着数值模拟技术的发展和提高,水动力学仿真分析得到了广泛的应用。但是由于水下发射环境极其复杂,非均匀流、波、发射抛落物强烈扰动等影响流场的因素很多,在数值计算中难以准确模拟,而对流场过于简化将会带来较大的计算误差<sup>[1]</sup>。因此需要利用试验结果验证、修正仿真计算模型和计算设置,通过数值模拟弥补试验样本量小的不足,从而得到更为准确的结果和波形规律。

### 1.1 CFD 计算

利用商用 CFD 分析软件中的 MIXTURE 多相流模型进行数值模拟计算。工作介质为高压燃气 - 水汽,初始压力和温度根据发射工况设置。采用内嵌 UDF 控制飞行器运动的动网格技术,对飞行器弹射出筒的过程进行仿真计算;监视设定的发射筒口附近点,获取该处随时间变化的压力值。

考虑到主要研究发射中筒口的压力变化规律,为了简化仿真计算并不失真实性,对发射过程做一定的简化,参考文献[7-10],对模型做近似假设:

- 1) 计算流场轴对称;
- 2) 把发射工质(燃气 - 水汽混合气体)作为理想气体,其气体参数按照实际混合燃气参数折算;
- 3) 忽略飞行器头部外形影响;
- 4) 计算起始时刻筒内混合燃气压力、温度分布均匀且为静止状态;
- 5) 不考虑水的汽化影响和发射筒的传热损失。

动网格区域设置采用文献[7]的设置,如图 1。

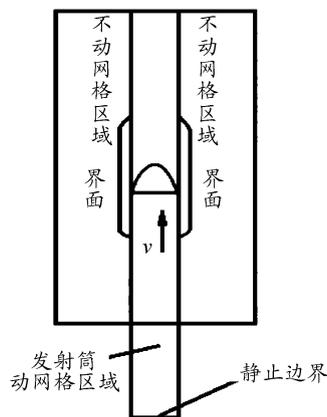


图 1 CFD 计算动网格设置

动网格采用 UDF 驱动,UDF 文件包括飞行器运动控制、并行计算控制、重力梯度压力入口边界指定等<sup>[9]</sup>。

### 1.2 发射试验

水下发射试验中在发射筒口布设压力传感器,连续测量发射过程中的筒口压力。试验方式能够真实获取试验工况下的筒口压力变化情况。通过分析试验结果,得到筒口压力的变化规律。

## 2 结果分析

### 2.1 筒口压力的波形

图 2 是筒口压力的典型波形(已扣除静水压,下同)。飞行器出筒过程中,筒口压力场有波动,但量值都比较小。紧随飞行器出筒,筒内燃气迅速外泄,筒口压力出现了第一个大的峰值(图 2 中 A 点)。由于水灌入发射筒和飞行器高速离开发射筒,筒口压力迅速下降。在经历了一个脉宽大约为峰值脉宽 2 倍的波谷后,筒口压力达到第二个峰值(图 2 中 C 点),此时发射筒泄出第二波燃气。之后压力以较为稳定的频率波动,波动幅值逐渐减小。从量值上看,第二个峰值最大,第一个峰值稍小于第二个峰值或与其量值相当。在 A 点和 C 点之间,筒口压力的波动频率和 C 点之后基本相同,只是由于发射筒水 - 燃气交换的影响,抑制了第二个波峰(图 2 中 B 点),造成其量值很小。

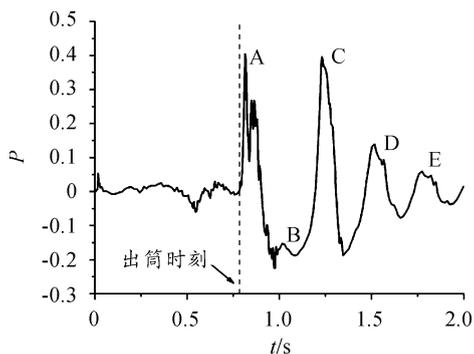


图 2 筒口压力的典型波形

## 2.2 筒口压力场量值模型

分析仿真计算和试验结果可见,第二个峰值之后,波动幅值基本上以指数规律迅速衰减。从第二个波峰开始,在扣除静水压后,可以将筒口压力  $P$  用有阻尼的振动方程形式近似表示:

$$P = P_0 e^{-\xi \omega t} \cos(\omega t) \quad (1)$$

式中时间  $t$  以第二个波峰出现的时刻为零点。 $P_0$  为初始幅值, $\omega$  为角频率, $\xi$  为衰减系数。

表1为本文所研究的系统8个典型工况的实测压力峰值及拟合系数(表中的压力峰值和  $P_0$  为实际值乘以某系数后的值)。表中  $f = \omega/(2\pi)$  为频率。

表1 8个典型工况的压力峰值及拟合系数

工况	$1/Eu$	压力峰值/MPa	$P_0$ /MPa	$\xi$	$\omega$ /(1/s)	$f$ /Hz
1	3.22	0.315	0.328	0.126	32.63	5.19
2	3.66	0.322	0.340	0.103	32.36	5.15
3	4.20	0.354	0.369	0.126	31.20	4.97
4	4.56	0.367	0.381	0.119	30.28	4.82
5	5.26	0.362	0.345	0.156	26.52	4.22
6	5.69	0.339	0.358	0.158	25.29	4.03
7	5.74	0.346	0.354	0.174	25.88	4.12
8	6.57	0.405	0.361	0.136	23.62	3.76

表1中的  $Eu$  为流场的欧拉数:

$$Eu = p/(\rho V^2) = gH/V^2 \quad (2)$$

$$1/Eu = V^2/gH \quad (3)$$

式中: $p$  为流场压力, $g$  为重力加速度, $H$  为发射深度, $V$  为飞行器的出筒速度。欧拉数为流体压力与惯性力的比,发射深度越大欧拉数越大,出筒速度越大,欧拉数越小。

以  $1/Eu$  为横坐标,筒口压力场的波动频率  $f$  为纵坐标,将表1中各工况的  $f$  绘于图3。图中的直线为各数据点的拟合直线。

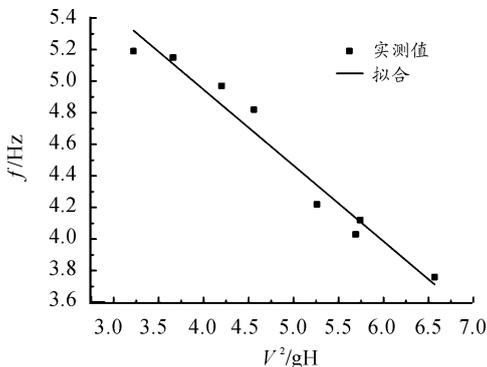


图3 波动频率  $f$  与  $V^2/(gH)$  的关系

图3显示了筒口压力场的波动频率  $f$  与出筒速度  $V$  和

发射深度  $H$  的关系。从图3可见,筒口压力场的波动频率  $f$  在量值上与欧拉数的倒数  $1/Eu$  近似成线性关系。对于本文所研究的系统,经拟合可得

$$f = -0.4803/Eu + 6.8682 \quad (4)$$

可见发射深度  $H$  越大,波动频率越高;出筒速度  $V$  越大,波动频率越低。

图4、图5为压力量值模型与实际试验值的比较。从图中可见,模型与实际试验值符合较好。

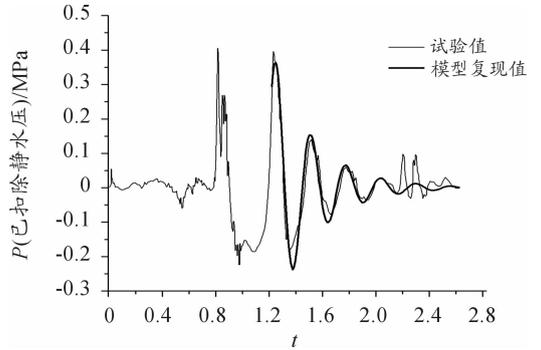


图4 筒口压力波动模型与试验实测值对比1 ( $Eu=0.152$ )

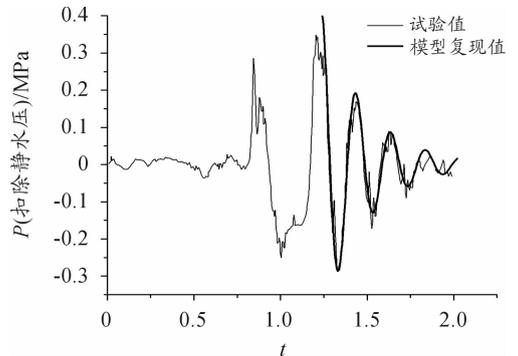


图5 筒口压力波动模型与试验实测值对比2 ( $Eu=0.237$ )

## 2.3 筒口压力波动规律分析

飞行器发射出筒后,发射筒内高温高压的燃气-水汽混合气体冲出发射筒,在筒口和飞行器底部之间形成燃气泡。由于燃气泡内压力高于周围水流场压力,并随着飞行器不断远离筒口,燃气泡向四周膨胀。伴随燃气泡体积的增大,其内部压力减小。当内部压力减小至环境压力时,由于惯性,燃气泡将继续膨胀一定时间后停止膨胀,内部压力也随之降到最低。此时燃气泡受到外围水流场的挤压,开始收缩,内部压力开始上升。同样由于惯性,当内部压力高于环境压力时,燃气泡继续收缩直至破裂,一方面在飞行器底部形成随体气泡,另一方面水流灌回发射筒。筒内未排出的燃气在受压后再次膨胀并冲出发射筒,在筒口重复膨胀-收缩的过程。受这一过程的影响,筒口的压力不断波动。仿真得到的筒口燃气泡的膨胀与收缩示意图见图6。

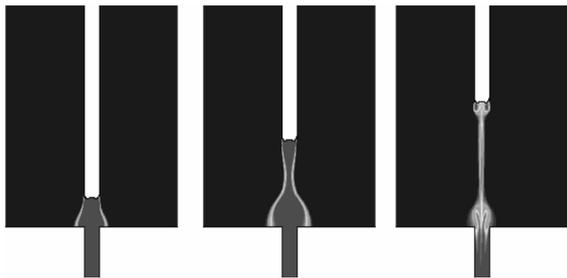


图6 CFD仿真的筒口燃气泡的膨胀与收缩示意图

欧拉数  $Eu = gH/V^2$  反映了流体压力与惯性力的关系。飞行器出筒速度  $V$  越大,发射的能量就越大。这样就使发射对流的扰动加大,增加了流体的扩张惯性,因此使燃气泡从膨胀到压缩的过程加长,压力场波动频率降低。飞行器发射深度  $H$  越大,流场环境压力越大。由于流场环境压力阻碍气泡膨胀,加速气泡收缩,因此气泡从膨胀到压缩的过程变短,压力场波动频率升高,也即筒口压力场的波动频率随流场欧拉数的增大而增大。

从筒口压力波动脉冲的峰值看,飞行器出筒速度越大,发射深度越深,发射的能量就越大。这样,流体的扩张惯性和对流的扰动就加大,因此压力波动脉冲峰值加大。相对于发射深度,压力波动峰值对出筒速度更为敏感。

### 3 结论

飞行器水下发射过程中,受飞行器运动、燃气泡膨胀收缩、筒口水气交换等因素的影响,筒口压力产生了较大幅度的波动。

飞行器出筒后,筒口压力场出现第一个压力峰值,在经历了一个脉宽大约为峰值脉宽2倍的波谷后,筒口压力达到第二个峰值。之后筒口压力以较为稳定的频率波动,波动幅值基本上以指数规律迅速衰减。从第二个波峰开始,压力波可以用有阻尼的振动方程来近似。波动幅值随出筒速度和

发射深度的增大而增大。筒口压力场的波动频率随流场欧拉数的增大而增大,与欧拉数的倒数近似成线性关系。

本文的结果对于发射筒口设备的结构设计、飞行器水下点火时机的选择等水下发射设计具有参考价值。

### 参考文献:

- [1] 黄寿康. 流体动力·弹道·载荷环境[M]. 北京:中国宇航出版社,2007:215-220.
- [2] 赵志敏,冯会全,冯旭. 导弹水中阻力特性分析[J]. 战术导弹技术,2009(1):7-20.
- [3] 权晓波,李岩,魏海鹏,等. 航行体出水过程空泡溃灭特性研究[J]. 船舶力学,2008,12(4):545-549.
- [4] 程栋,何国强,胡仁海,等. 发射筒口燃气压力波数值模拟及实验验证[J]. 西北工业大学学报,2011,29(3):497-502.
- [5] 邢军. 筒口压力场数值仿真研究[D]. 郑州:郑州机电工程研究所,2006.
- [6] 吴菊华. 潜射导弹筒口压力场研究[D]. 北京:北京理工大学,2006.
- [7] 王汉平,余文辉,魏建峰. 潜射模拟弹筒口压力场仿真. 兵工学报[J]. 2009,30(8):1009-1013.
- [8] 王汉平,吴菊华. 基于CFD的潜射导弹筒口压力场预测[J]. 弹道学报,2008,20(4):73-87.
- [9] 王亚东,袁绪龙,覃东升. 导弹水下发射筒口气泡特性研究[J]. 兵工学报,2011,32(8):991-995.
- [10] 邱海强,袁绪龙,王亚东,等. 潜射导弹筒口气泡发展规律研究[J]. 兵工学报,2014,35(9):1510-1514.
- [11] 申丽辉. 航行体水下及出水过程的流体特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

(责任编辑 周江川)