

脉冲防暴水炮发射管内的建模与二维仿真

汪 送, 战仁军

(武警工程学院 研究生管理大队, 陕西 西安 710086)

摘 要:为优化设计,奠定外流场研究的基础,建立了求解脉冲防暴水炮发射管内压力,水柱速度及摩擦力的计算模型。使用商业 Fluent 软件对发射管内高压气体冲击水柱进行二维数值模拟,采用 $k-\epsilon$ 模型描述湍流分布,二维 VOF 模型追踪发射管内的气液界面。模拟得到了气液界面的演化图像,出口速度矢量分布,以及不同时刻管内对称轴上的压力分布。将所建立模型的理论计算值与模拟值进行比较,分析了两者的吻合情况。仿真结果证明:水柱的管内运动压力起主要作用,重力作用并不明显,压力梯度较大的区域出现在水柱段,模拟值与理论计算值基本吻合,可利用模拟值对计算模型进行修正。所得结论对于水炮类非致命武器的设计及水炮外流场的研究有一定的指导意义。

关键词:非致命武器;脉冲防暴水炮;二维仿真;发射管

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2009.04.009

中图分类号:TV131 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2009)04-0037-06

警用脉冲防暴水炮作为武警部队处置群体性事件的主要非致命装备,对各种反恐、处突任务的顺利完成起着重要作用^[1]。脉冲防暴水炮以压缩空气作为驱动力,向目标定向高速发射带有刺激剂的脉冲水柱,水柱在大气中破碎、雾化和扩散,形成和产生具有刺激性的雾幕,以达到驱散骚乱人群的目的。水箱容积和有效射程限制了防暴水炮的发展^[2]。单纯增大气室压力及增大水箱容积易导致装备经济性和动力性下降。因此,要提高技术性能,应提高刺激剂颗粒雾化水平、改善管外射流结构等,而这些与管内的气液相互作用过程直接相关。

脉冲防暴水炮管内气液运动属于大尺寸短圆管内高速高压气液两相湍流,由于实验和模拟的高代价,相关的研究和报道较少。赵俊利等^[3]应用火炮内弹道和气体动力学理论,给出了气体炮内弹道的计算公式和部分参数,并验证了公式的实用性。战仁军等^[4]利用 Fluent 软件对防暴水炮喷嘴内部的流场进行了模拟,得到了喷嘴结构参数与出口速度及压力的关系曲线。Federico Montanari 等^[5]用 Fluent 软件对水炮的水弹发射时的飞行过程进行了模拟,证实了 Fluent 软件对水雾形状的改变以及水对目标的冲击进行分析的可行性。文献[6]利用相似原理建立了警用脉冲防暴水炮的实验模型,采用有机玻璃来制成炮管模型,用高速摄影机对管内气液动力过程进行分析研究。

本文在对脉冲水炮发射管内气液作用过程及前人工作进行深入分析的基础上,建立了求解压力、速度和摩擦力的计算模型;采用 Fluent 软件模拟了发射过程的管内运动,得到了气液界面的演化图像、出口速度矢量分布和对称轴不同时刻的速度分布,并将仿真结果与计算结果进行了比较,使管内运动变得可视化,证实了公式用于计算的可行性。

1 发射管内数学模型的建立

* 收稿日期:2009-03-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50876113)

作者简介:汪 送(1984-),男,湖南衡阳人,硕士生,主要从事多相流动及数值计算研究;

E-mail:onesoon@163.com

战仁军(1963-),男,山东烟台人,教授,博士生导师,主要从事军事装备和非致命武器研究。

1.1 基本假设

①水柱在气体作用下向前运动时水柱后的压力分布均匀,大小相等;②水柱为圆柱形,刚性结构,不考虑变形和气液间的掺混;③由于发射过程时间较短,气体膨胀被认为是等熵过程。

1.2 系统结构及工作原理

脉冲水炮由炮管、供气和供水等装置组成。炮管由气室、炮管和喷嘴组成。图1为脉冲防暴水炮发射原理简图。

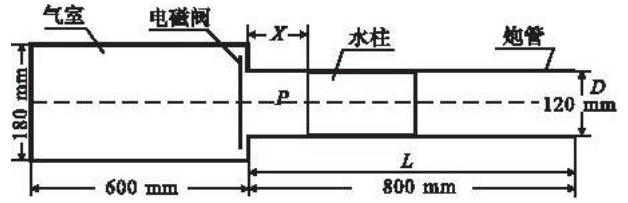


图1 脉冲防暴水炮发射原理简图
Fig.1 Launch theory diagram of pulsed water cannon

发射准备状态:关闭电磁阀,水柱处于 $x=0$ 的位置,向气室充气至要求的气压;发射状态:开启电磁阀,压缩气体推动水柱向前运动,水柱后的气室容积不断增大,压力逐渐降低,同时不断对水柱加速至炮口 $x=L$ 处,水柱获得最大速度完成发射过程,在出口处高压气体迅速膨胀,对水柱有加速和雾化作用。

1.3 管内建模

由气体动力学的气体等熵方程^[4],得水柱后压力为:

$$P_1 = \frac{P_0 V_0^\gamma}{(V_0 + Ax)^\gamma} \tag{1}$$

式中: P_1 为气室压力; P_0 为气室初始压力; V_0 为气室初始容积; A 为发射管截面积; x 为水柱前进距离; $\gamma=1.4$ 为绝热指数。

忽略出口大气压力做功,气体膨胀做功方程为: $W = A \int_0^x P_1 dx$,式中: W 为气体膨胀所做的功; P_0 是大气压力。将式(1)代入上式,得:

$$W = A \int_0^x \frac{P_0 V_0^\gamma}{(V_0 + Ax)^\gamma} dx$$

上式积分得:

$$W = \frac{P_0 V_0^\gamma}{1 - \gamma} [(V_0 + Ax)^{1-\gamma} - V_0^{1-\gamma}]$$

整理后得:

$$W = \frac{P_0 V_0}{\gamma - 1} \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{Ax}{V_0} \right)^{\gamma-1}} \right] \tag{2}$$

对于一些复杂的物理过程,暂时无法列出基本微分方程,用因次分析方法导出相似准数和准数方程是简便可行的。因次分析法是借助于有关物理量的因次之间的和谐关系来探求物理方程形式的一种手段^[7]。

脉冲防暴水炮发射时,水柱与炮管间的摩擦力将消耗一部分高压气体膨胀功。经分析,摩擦力 F 与水柱的速度 v ,水的密度 ρ ,动力粘度 μ ,炮管的直径 D 及管壁的粗糙度 Δ 有关。则有:

$$F = f(v, \rho, \mu, D, L, \Delta)$$

选用 L, M, T 为基本量纲,可得如下量纲(物理量 / 量纲): $F/MLT^{-2}; v/LT^{-1}; \rho/ML^{-3}; \mu/ML^{-1}T^{-1}; D/L; l/L; \Delta/L$

由伯金汉 π 定律,可得单项指数方程为:

$$F = kv^{\partial_1} \rho^{\partial_2} \mu^{\partial_3} D^{\partial_4} l^{\partial_5} \Delta^{\partial_6} \tag{3}$$

式中 k 为待定常数,转化成量纲形式有:

$$[MLT^{-2}] = [LT^{-1}]^{\partial_1} [ML^{-3}]^{\partial_2} [ML^{-1}T^{-1}]^{\partial_3} [L]^{\partial_4} [L]^{\partial_5} [L]^{\partial_6}$$

$$[MLT^{-2}] = [M^{\partial_2+\partial_3} L^{\partial_1-3\partial_2-\partial_3+\partial_4+\partial_5+\partial_6} T^{-\partial_1-\partial_3}]$$

由量纲和谐原理可得 $\partial_2 + \partial_3 = 1, \partial_1 - 3\partial_2 - \partial_3 + \partial_4 + \partial_5 + \partial_6 = 1, \partial_1 + \partial_3 = 2$ 。3个方程,6个未知数,可解得: $\partial_2 = 1 - \partial_3, \partial_1 = 2 - \partial_3, \partial_4 = 2 - \partial_3 - \partial_5, -\partial_6$ 。代回式(3)得:

$$F = kv^{2-\partial_3} \rho^{1-\partial_3} \mu^{\partial_3} D^{2-\partial_3-\partial_5-\partial_6} l^{\partial_5} \Delta^{\partial_6} = k(\rho D/\mu)^{-\partial_3} (l/D)^{\partial_5} (\Delta/D)^{\partial_6} \rho D^2 v^2 = kRe^{-\partial_3} (l/D)^{\partial_5} (\Delta/D)^{\partial_6} \rho D^2 v^2$$

设阻力系数为 C_D ,则 $C_D = f(Re, l/D, \Delta/D)$,可得阻力计算公式 $F = C_D \rho D^2 v^2$,式中阻力系数 C_D 是雷诺

数 Re 与 l/D 和 Δ/D 的函数。从阻力系数公式可以看出,实验时只要改变速度、管径就可以得到阻力的经验计算公式。

由于高速气体的质量相对于水柱和炮管来说较小,为简化计算,忽略其动量,由动量守恒定律可得

$$m_1 v_1 = m_2 v_2 \quad (4)$$

式中 m_1, V_1, m_2, V_2 分别为水、炮管的质量和速度。

压缩气体膨胀所做的功,转化为水柱的动能、炮管后坐动能、摩擦损失、以及高压气体的动能(因较小忽略),根据能量守恒定律,有:

$$W_z = W_{mc} + W_s + W_p \quad (5)$$

W_z 为气体膨胀所做的总功, W_{mc} 为摩擦力所消耗的功, W_s 为水柱所获得的动能, W_p 为炮管后坐所消耗的动能,将式(2)代入式(5)得:

$$W_{mc} + W_s + W_p = \frac{P_{10} V_0}{\gamma - 1} \left[1 - \frac{1}{(1 + A x / V_0)^{\gamma - 1}} \right] \quad (6)$$

上述方程联立,可得脉冲防暴水炮发射管内方程组:

$$\begin{cases} W_{mc} + W_s + W_p = \frac{P_{10} V_0}{\gamma - 1} \left[1 - \frac{1}{(1 + A x / V_0)^{\gamma - 1}} \right] \\ F = C_D \rho D^2 v^2 \\ C_D = f(Re) \frac{\Delta}{D} \end{cases}$$

由于摩擦阻力系数需要通过多次实验方可确定,因此引入次要功系数 Φ ,可得方程

$$\frac{1}{2} \Phi m_1 v_1^2 \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right) = \frac{P_{10} V_0}{\gamma - 1} \left[1 - \frac{1}{(1 + A x / V_0)^{\gamma - 1}} \right] \quad (7)$$

式中 Φ 为一经验值,只要给定 Φ 及一些初始条件就可以得到水炮管内的水柱速度。

2 仿真分析

现采用 Fluent 软件对脉冲防暴水炮炮管内的物理过程进行数值模拟,获得出口速度和出口压力,来验证数学模型的准确性^[8]。

2.1 模型的建立

由于管内水柱加速较快,模拟采用 $k-\epsilon$ 模型描述湍流分布,用二维 VOF 模型追踪发射管内的气液界面。VOF 模型是一种在固定的欧拉网格下的表面跟踪方法,通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一流体的体积分数来模拟 2 种或 3 种不能混合的流体。典型应用包括分层流、自由面流动、灌注、求得气液界面的稳态或瞬时分界面等^[9]。

2.2 网格划分

网格的划分关系到计算的精度和收敛性,因此必须十分慎重。为了保证计算的速度和精度,本文采用了结构化网格,考虑到摩擦阻力的存在,对固壁附近的网格实行了加密处理,见图 2。

2.3 初始及边界条件的确定

本系统压缩空气通过膨胀推动水柱前进做功,模拟时没有入口边界条件,高压气体通过自动膨胀来对水柱进行加速。出口边界使用压力出口。采用壁面函数方程,考虑重力的影响。气室初始压力 2.5 MPa,水柱长度 0.8 mm,出口压力为 0。

2.4 仿真结果及分析

脉冲防暴水炮发射管内气液界面的追踪问题是研究的重点之一,本文采用二维 VOF 方法来追踪气液界面,得到界面演化过程见图 3。

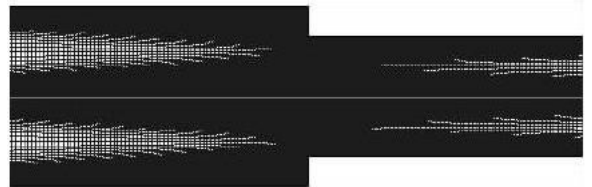


图 2 网格局部放大图

Fig. 2 Magnified local diagram of grid

从图 3 可知,气液界面的形状基本成对称式分布,说明在 0.8 mm 的炮管长度下,惯性力(压力)与重力相比对水柱的作用更为明显。界面的形状与高压气室和炮管的结合方式有关,本文暂不考虑高压气嘴对气液界面的影响。从图 4 中 21.5 ms 时刻发射管出口处的速度矢量图可以看出,被水柱包裹的气泡速度(见图 3 的 19.5 ms 时的界面图)比水柱的速度要快,这种高速气泡在管口迅速膨胀,除了可以对水柱有加速作用外,对水柱的雾化也有极大的推动作用,这是脉冲式气液喷雾技术较传统的活塞式推动的优点所在。

图 5 为发射管内不同时刻的对称轴速度分布图,3 个时刻的压力曲线都有一个转折点,即是对称轴上气液界面的位置。在界面的后部,即高压气室段,压力值基本相等,与 1.1 的假设①相符;在界面的前部,即水柱段,压力梯度比较大,成直线下降,直到降到出口处的 0。

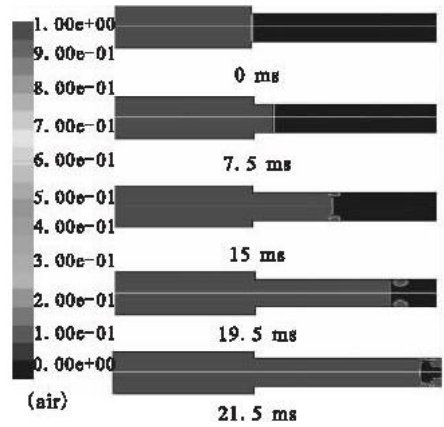


图 3 脉冲防水炮发射管内水柱演化过程
Fig. 3 Water column evolution process in launch pipe of pulsed anti-riots water cannon

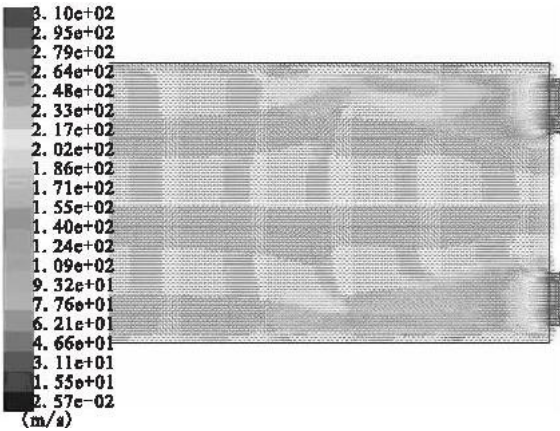


图 4 21.5 ms 时发射管出口处速度矢量图
Fig. 4 Nozzle velocity vectorgraph of launch pipe at 21.5 ms

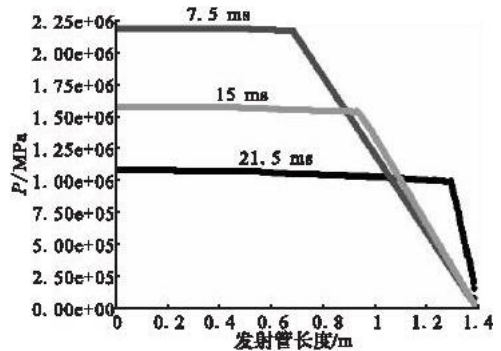


图 5 不同时刻管内对称轴压力分布
Fig. 5 Pressure distribution at symmetrical axis in launch pipe

3 模拟结果的验证

为验证模拟结果与模型的准确性,计算管内不同位置的压力和速度值,并与模拟值进行比较,得到了图 6、图 7 所示的比较曲线。

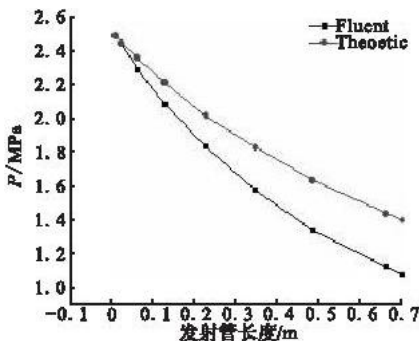


图 6 气室压力模拟值与理论值的比较
Fig. 6 Pressure compare of simulation result to theoretic result

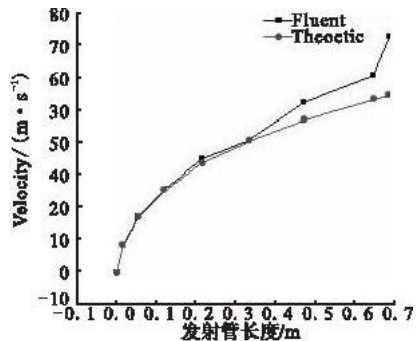


图 7 水柱速度模拟值与理论值的比较
Fig. 7 Velocity compare of simulation result to theoretic result

3.1 压力值的比较

通过模拟得到各个位置水柱后的压力值,将此时的 x (取高压气室出口为起点),代入方程(1),得到不同时刻的压力计算值,将压力计算值与模拟值进行比较,得到图6所示的曲线。从图可知,两者的下降趋势基本相同,但模拟值比理论计算值小,这是因为高压气体的静压逐渐转化为水柱的动压,这种趋势随着时间的增长逐渐明显。为修正方程,可以给定一个系数 α 使两者吻合的更好。

3.2 水柱速度值的比较

同理,可以比较不同位置的水柱速度。将方程(7)进行转换,不考虑后坐能量、摩擦损失及高压气体动能,即假设气体膨胀所做的功全部转化为水柱的动能,可得方程:

$$v_0^2 = \frac{2p_{10}V_0}{m(\gamma-1)} \left[1 - \frac{1}{(1+AL/V_0)^{\gamma-1}} \right] \quad (8)$$

式中: m 为水柱质量; L 为炮管长度。

将方程(8)的计算值与模拟值比较,可得到图7所示的比较曲线。从图可知,两者在发射管的前段吻合较好,后段计算值较模拟值小,这是因为水柱的质量逐渐减小,没有对方程中的 m 进行及时修改所致。

4 结束语

本文在对前人工作及水炮工作原理进行深入分析的基础上,做了以下工作:

1)利用气体动力学理论、力学基本定律及因次分析方法求得了脉冲防暴水炮发射管内的数学模型;
2)采用 Fluent 软件对水炮发射过程进行了管内数值模拟,得到了管内的气液界面图像,分析了不同时刻对称轴的速度分布,结果表明:管内运动压力其主要作用,重力作用并不明显,管内压力梯度减小较大的区域出现的水柱段;

3)将所建立模型的压力和速度的理论计算值与软件的模拟值进行了比较,分析了两者的吻合情况。

数学模型需要通过实验来完善,模拟时没有考虑后坐力的影响,下一步将采用 Fluent 软件的动网格技术,给炮管一个后坐速度,从而使模拟更为真实。

参考文献:

- [1] Neil Davison. The Early History of Non-Lethal Weapons[M].Bradford;University of Bradford,2006:158-162.
- [2] Symons M,Smith G. Less Lethal Technologies, Review of Commercially Available and Near-Market Products for the Association of Chief Police Officers[M].UK;Home Office Scientific Development Branch,2008.
- [3] 赵俊利,高跃飞.气体炮实用内弹道技术研究[J].太原理工大学学报,2004,34(3):54-56.
ZHAO Junli,GAO Yuefei. Study on the Interior Ballistics of the Gas Gun[J].Journal of Taiyuan University of Technology,2004,34(3):54-56. (in Chinese)
- [4] ZHAN Renjun, WANG Song. Emulational Design of New-style Police Pulsed Anti-riots Water Cannon Based on Fluent[C]/5th European Symposium on Non-Lethal Weapons. German:[s. n.],2009:1-6.
- [5] Federico Montanari.Exploratory CFD Analyses of the Fluid Dynamics of A Water Cannon[R]. AIAA 2005-1293
- [6] 汪 送,战仁军. 警用脉冲防暴水炮实验系统设计[J]. 长春工业大学学报:自然科学版,2009,30(2):173-177.
WANG Song, ZHAN Renjun. Experiment System Design of Police Pulsed Anti-riots Water Cannon[J].Journal of Changchun University of technology:Natural Science Edition,2009,30(2):173-177. (in Chinese)
- [7] 李文科.工程流体力学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2007:225-226.
LI Wenke. Engineering Hydrodynamics[M]. Hefei:Publishing Company of Chinese Technology University,2007:225-226. (in Chinese)
- [8] 王福军.计算流体动力学分析—CFD 软件原理与应用(第2版)[M].北京:清华大学出版社,2005:185.
WANG Fujun.CFD Software Theory and Application (Second Edition)[M].Beijing:Tsinghua University Press,2005:185. (in Chinese)
- [9] 王瑞金,张 凯,王 刚.Fluent 技术基础与应用实例[M].北京:清华大学出版社,2007:135-136.
WANG Ruijin, ZHANG Kai,WANG Gang. Fluent Technique Foundation and Application Instance[M].Beijing:Tsinghua University Press,2007:135-136. (in Chinese)

Model and 2-D Simulation Analysis of Launch Pipe of Police Pulsed Anti-riots Water Cannon

WANG Song, ZHAN Ren-jun

(Engineering College of CAPF, Xi'an 710086, Shaanxi, China)

Abstract: In order to optimize design and establish a study foundation for outside flow-field, computational models for solving pressure, velocity of water column and friction force in the launch pipe of pulsed anti-riots water cannon are established. Commercial software FLUENT is used to simulate the process of high-pressure gas impinging into water column, $k-\epsilon$ model is used to describe the turbulence distribution, and VOF model is used to trace the gas-liquid interface in pipe. Through the simulation, the gas-liquid interface evolvment image, vector distribution of exit velocity and pressure distribution at symmetrical axis in launch pipe are gained. The theoretical calculation values of the established models are compared with the simulation results, and the situation of their conforming with each other is analyzed. The move of water column is influenced by the inertia force primarily, not by the gravitation. The greater pressure grad presents in the water column area, the theoretical calculation value and the simulation result match well, and the latter one can be used to amend the computational model. The conclusion obtained has some guide sense in the study of outside flow-field, the design of water cannon or same non-lethal weapons.

Key words: non-lethal weapons; anti-riots water cannon; 2-D simulation; launch pipe

(上接第 23 页)

Influence of Back Pressure on the Inner Flow Field in Scramjet Isolator

FENG Jin-hu, GAO Feng, LIU Hua, LI Min-jian

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China)

Abstract: Isolator is a key component of Scramjet in achieving dual-mode and mode transition, and it separates the inlet from the combustion chamber, thus preventing the effect of combustion back pressure on the inlet and guaranteeing the security and stabilization of aircraft. Combined with the problem of combustion chamber work stability, a numerical simulation of axial symmetry isolators with same cross section is performed with FLUENT6.2. When the Mach number of the inflow is 2, isolator with different ratios of length to height is investigated and the influence of back pressure on the location and structure of the shock train and on the performance of the isolator is analyzed. The results show that the back pressure has ahead transmission on the shock train of the isolator, which results in the complexity of the shock train structure and the decrease of the outlet distortion degree. The ratio of length to height has a great influence on the correlation between the location of the shock train and the back pressure. If the ratio of length to height is not too high, the location of the first shock wave will have a linear relation with the back pressure, and the changing speed is in direct proportion to the ratio of length to height. Otherwise, the linear correlation will not hold true.

Key words: scramjet; isolator; numerical simulation; back pressure; shock train