

文章编号: 1001-1455(2014)03-0272-06

# 一种基于气体炮加载技术和惯性抛射原理的水冲击实验装置\*

刘显军, 王小龙, 李思忠, 钟卫洲, 周本全

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 基于气体炮加载技术和惯性抛射原理, 研制了一套水冲击实验装置, 可实现规则形状水柱按照设定速度发射。该装置在活塞推射技术的基础上, 设计了一个抛射筒取代活塞, 将水柱装在抛射筒内; 利用气体炮产生的动力加载抛射筒, 达到设定速度时撞击缓冲件得到减速, 筒内水柱在惯性作用下飞出。抛射筒材料采用高强度合金钢, 缓冲件材料采用橡胶, 抛射筒在装置发射水柱后可再次使用。使用该装置开展了  $\varnothing 200 \text{ mm} \times 1 \text{ m}$  尺寸水柱的发射实验, 水柱速度及形状均满足水冲击实验的要求; 采用非接触的光电测速方法测量了发射速度, 与理论计算结果比较符合。

**关键词:** 爆炸力学; 抛射筒; 气体炮; 惯性作用; 水冲击装置; 缓冲; 光电测速

**中图分类号:** O385      **国标学科代码:** 13035      **文献标志码:** A

相对于火箭撬、电炮等加载设备, 利用压缩气体作动力源的气体炮<sup>[1-4]</sup>具有干净、易实现等优点, 应用越来越广泛。随着各种缓冲材料(如橡胶、泡沫铝等)和缓冲器的开发利用<sup>[5-7]</sup>, 高速负载的缓冲与回收技术也越来越成熟, 使惯性抛射技术的应用越来越广泛, 如各种冲击实验设备、弹丸加载装置等<sup>[8-9]</sup>。在水冲击实验<sup>[10-12]</sup>中, 需要发射具有一定速度的规则形状水柱, 作为实验件入水出水冲击过程模拟的实验条件。目前的水流发射装置如水压凿岩机等<sup>[13-14]</sup>, 都通过活塞推射的方式实现水流射出, 速度与冲击力可调节, 但由于活塞作用到水面上的压力不均匀, 水柱形状容易破坏, 不符合水冲击实验的要求。

本文中基于气体炮加载技术和惯性抛射原理, 研制一套水冲击实验装置, 可实现规则形状水柱按照设定速度发射, 为各种水冲击实验提供技术手段。

## 1 装置设计

### 1.1 装置发射原理

该装置在活塞推射技术的基础上, 设计一抛射筒取代活塞, 将水柱装在抛射筒内; 利用气体炮产生的动力加载抛射筒, 达到设定速度时撞击缓冲件得到减速, 筒内水柱在惯性作用下飞出; 根据一级气体炮内弹道理论, 可计算出水柱飞出速度。抛射筒材料采用高强度合金钢, 缓冲件材料采用橡胶, 装置在发射水柱后抛射筒可再次使用。

如图1所示, 装置工作过程为以下4个步骤: (1) 首先关闭阀门, 抛射筒放置到位, 并在气室中充满压缩空气; (2) 打开阀门, 气室内压缩空气瞬间释放, 产生的压力  $p$  将推动抛射筒(内装待抛物)在炮管内加速; (3) 当抛射筒完成加速后, 将获得一定的初速度  $v$ , 并撞击缓冲件; (4) 抛射筒受缓冲作用减速停下, 最后待抛物在惯性的作用下以速度  $v_0$  (略小于  $v$ ) 发射出去。

根据一级气体炮的内弹道理论<sup>[1]</sup>, 不考虑各种摩擦与损耗时, 抛射筒获得的速度

$$v = \left( \frac{2\bar{p} L_f / D_f}{\rho l / D_f} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中:  $\bar{p}$  为发射过程中筒后平均压力,  $\rho, l$  为抛射筒平均密度、长度,  $L_f, D_f$  为炮管长度和内径。

\* 收稿日期: 2012-11-22; 修回日期: 2013-05-29

作者简介: 刘显军(1985—), 男, 硕士研究生, 工程师。

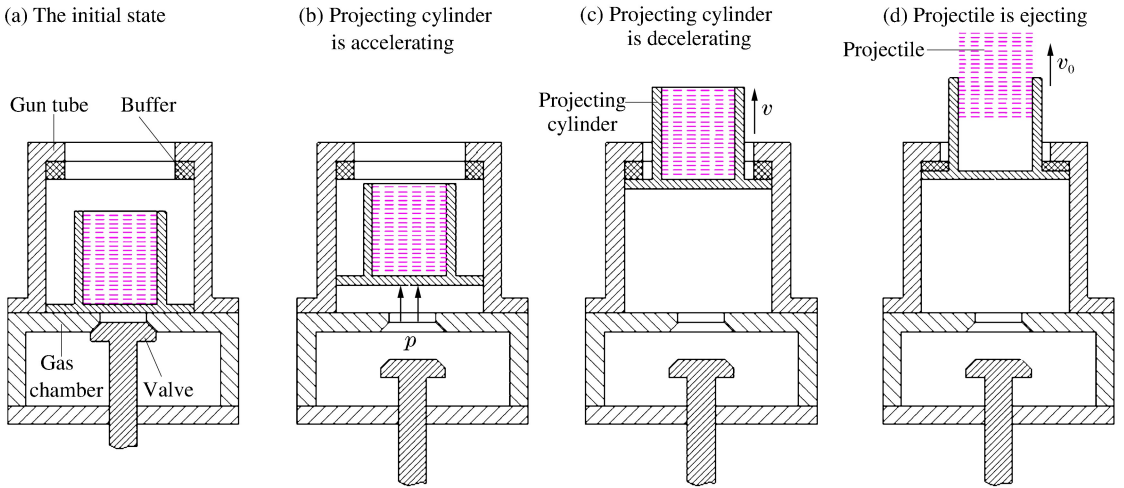


图 1 基于气体炮加载技术的惯性抛射原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of inertia projecting based on load technology of gas gun

基于上述惯性抛射原理来实现规则水柱的发射,利用流体模拟软件 FLUENT 进行模拟。如图 2 所示,抛射筒(内装水)以 35 m/s 的速度向上运动,某时刻迅速回收抛射筒,使其在短距离内速度降为零,水柱因惯性作用飞出,出筒速度大于 30 m/s、水柱形状保持较好。模拟结果表明,惯性抛射方式可实现规则形状水柱的发射。

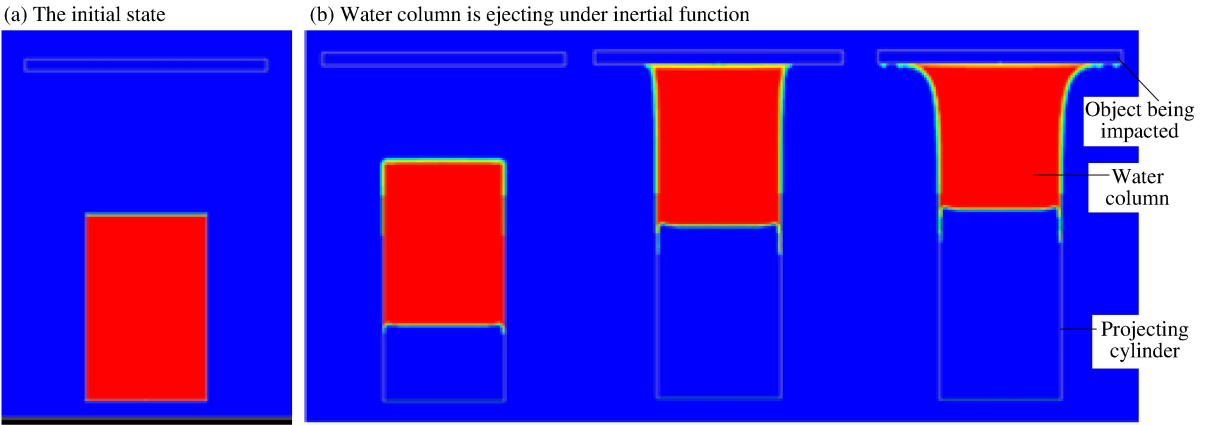


图 2 水柱惯性抛射的模拟分析结果

Fig. 2 Simulation analysis of ejecting water column by inertia effect

### 1.2 装置结构组成

装置总体结构如图 3 所示,主要由气室、活塞、炮管、抛射筒、缓冲件、限位环等组成。气室中充满压缩空气,活塞打开以后,气体瞬间释放产生的动力推动抛射筒在炮管内运动,获得一定速度后撞击缓冲件减速,抛射筒内水在惯性作用下飞出,从而实现规则形状水柱的发射。

气室分为前、后 2 个腔,前腔用于充压缩气体,后腔给活塞提供运动空间。

活塞由活塞杆和密封锥 2 部分组成,活塞杆在气室后腔运动,密封锥采用铜材料、可压紧气室前腔放气口。

为了拆装方便,炮管由炮管口和炮管座 2 部分组成;炮管口周壁上开有条形槽,可及时排放发射过程中释放的空气。

抛射筒由薄壁圆筒和撞击盘组成,连接部位局部加厚,可提高强度。

缓冲垫安装于炮管口处,环向安装间隙大于缓冲垫厚度,以提供膨胀空间。

限位环采用铜材料,可在不碰伤抛射筒的前提下起导向作用。

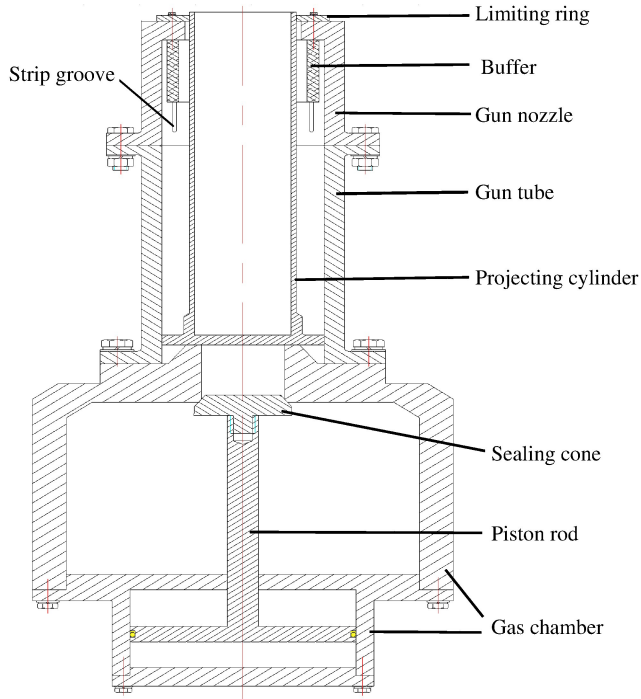


图 3 水冲击实验装置结构

Fig. 3 Structure of device for ejecting water

### 1.3 抛射筒冲击与缓冲分析

设抛射筒尺寸为直径 200 mm、长 1 m, 装满水后总质量约为 100 kg, 经气体炮加载后获得的速度为 35 m/s, 根据动能定理, 抛射筒撞击缓冲垫的总能量为 61.25 kJ。抛射筒材料采用高强度合金(如 30CrMnSiA), 缓冲垫材料采用丁基橡胶, 通过有限元模拟分析得到, 如图 4 所示: 抛射筒壁、盘连接根部的应力最大(676 MPa), 在材料的允许范围内(30CrMnSiA 材料的屈服应力可达 800 MPa 以上), 这说明抛射筒未发生塑性破坏、下次实验可再次使用; 缓冲垫最大压缩量约为 62 mm, 属于弹性变形, 压

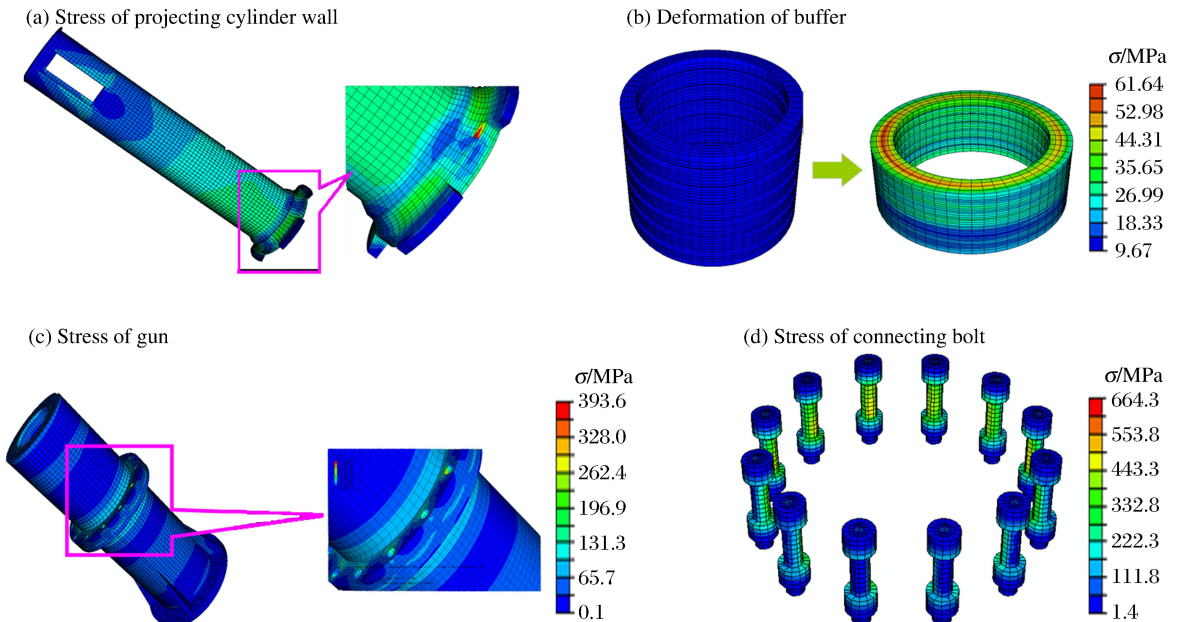


图 4 水柱惯性抛射的模拟分析结果

Fig. 4 Simulation analysis of ejecting water column by inertia effect

缩后将恢复变形,炮管的螺栓连接处应力最大(约 390 MPa),一般的中等强度材料即可满足;炮管口和炮管座的连接螺栓应力最大约 660 MPa,8.9 级强度螺栓可满足连接要求。

### 1.4 抛射筒发射速度测试

采用一种非接触式的光电测速方法,如图 5 所示,2 对光纤传感器(每 1 对包括 1 个发射器、1 个接收器)相距  $L$ ,抛射筒运动过程中依次通过 2 对传感器并挡住光线,从传感器信号中读取光线被遮挡的时刻  $t_1$ 、 $t_2$ ,则抛射筒速度为  $v=L / (t_1 - t_2)$ 。该测速方法易于控制、测试精度高,不受水环境影响。

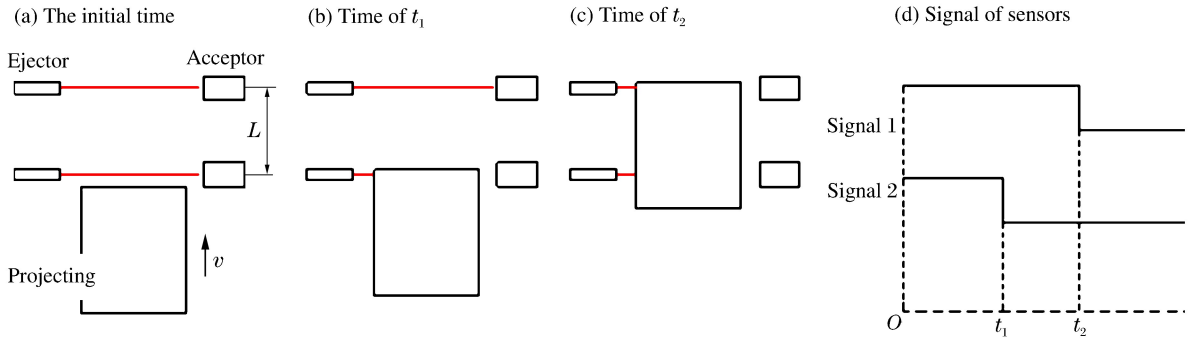


图 5 抛射筒发射速度的非接触式测量方法

Fig. 5 Uncontacted method for measuring speed of projecting cylinder

## 2 实验结果

根据上述设计,研制了一套水冲击实验装置,主要技术指标为:

- (1)装置重约 3.5 t,高约 3 m;
- (2)可发射水柱尺寸为  $\varnothing 200 \text{ mm} \times 1 \text{ m}$ ;
- (3)水柱发射速度可达 40 m/s,速度测量精度可达 0.01 m。

采用该装置开展了实验,实现了尺寸为  $\varnothing 200 \text{ mm} \times 1 \text{ m}$  水柱的发射,如图 6 所示,水柱出筒时形状较好,喷出的水柱可以用作各种结构件的水冲击实验,水柱发射后抛射筒后保持完好。在气室压力为 1.0 MPa 时,开展发射实验,通过非接触式测量方法<sup>[15]</sup>测定抛射筒获得的速度为 30.15 m/s,而利用式(1)计算得到的速度为 32 m/s,实际值与理论值比较接近,误差是由于式(1)没有考虑各种摩擦与损耗;实验时设定不同的气室压力,即可获得抛射筒不同的加载速度,从而得到水柱发射的设定速度。

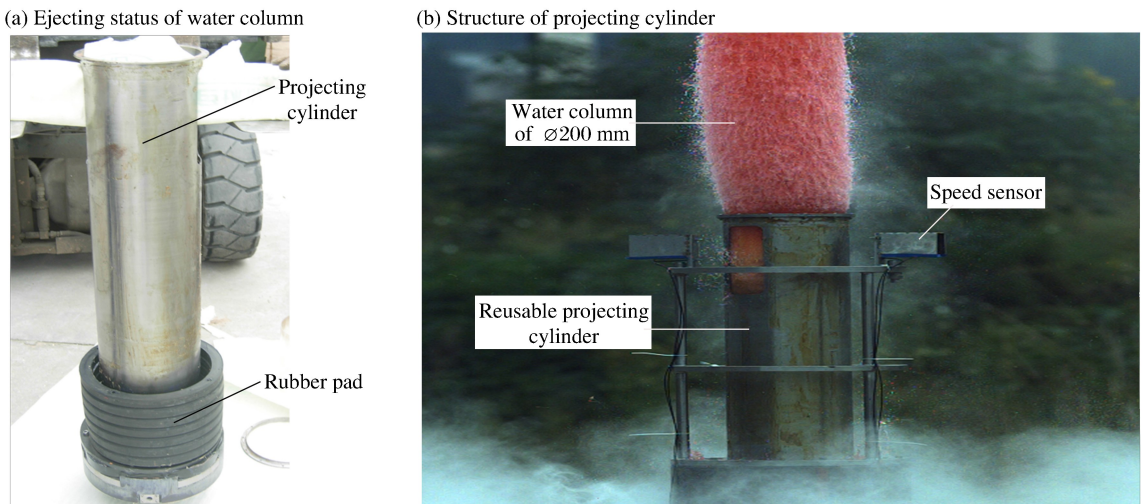


图 6 惯性抛射装置的水柱发射实验

Fig. 6 Photo of device for ejecting water column

### 3 结 语

基于气体炮加载技术和惯性抛射原理,研制了可实现规则形状水柱按照设定速度发射的抛射装置。该装置利用气体炮动力加载装有水的抛射筒,达到设定速度时撞击缓冲件得到减速,筒内水柱在惯性作用下飞出;抛射筒材料采用高强度合金钢,缓冲件材料采用橡胶,在水柱发射后抛射筒可再次使用。采用该装置开展了尺寸为 $\varnothing 200\text{ mm}\times 1\text{ m}$ 水柱的发射实验,水柱速度与形状均满足水冲击实验的要求;采用非接触的光电测速方法测量了发射速度,与理论计算结果相符合。

### 参考文献:

- [1] 王金贵. 气体炮原理及技术[M]. 北京:国防工业出版社,2001.
- [2] 夏正友,张河,陈家安. 一种非火药驱动气体炮内弹道模型及发射诸元协调[J]. 爆炸与冲击,1999,19(2):146-150.  
Xia Zheng-you, Zhang He, Chen Jia-an. Optimization of parameters of ballistic models for a new kind of non powder gas gun projection[J]. Explosion and Shock Waves, 1999,19(2):146-150.
- [3] 赵剑衡,孙承纬,唐小松,等. 高效能电炮实验装置的研制[J]. 实验力学,2006,21(3):369-374.  
Zhao Jian-heng, Sun Cheng-wei, Tang Xiao-song, et al. Development of electric gun with high performance[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006,21(3):369-374.
- [4] 李金河,庞勇,赵继波. 火箭橇试验加载技术研究[J]. 弹箭与制导学报,2000,30(5):137-139.  
Li Jin-he, Pang Yong, Zhao Ji-bo. The study on load technique for rocket sled experiment[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2000,30(5):137-139.
- [5] 刘乘,任亚东. 几种常用缓冲材料的性能研究[J]. 包装工程,2010,31(7):117-119.  
Liu Cheng, Ren Ya-dong. Research on properties of several cushion materials[J]. Packaging Engineering, 2010,31(7):117-119.
- [6] 蒋家桥,黄西成,胡时胜. 泡沫金属缓冲器的设计新方法及应用[J]. 爆炸与冲击,2004,24(6):520-523.  
Jiang Jia-qiao, Huang Xi-cheng, Hu Shi-sheng. Application and design of the foam metallic buffer[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(6):520-523.
- [7] 孙大刚,解彩雨,马卫东,等. 工程机械常用橡胶缓冲结构的有限元分析[J]. 工程机械,2005,26(9):18-22.  
Sun Da-gang, Xie Cai-yu, Ma Wei-dong, et al. Finite element analysis on common rubber damping structures of construction machinery[J]. Construction Machinery and Equipment, 2005,26(9):18-22.
- [8] 翁雪涛,黄映云,朱石坚,等. 利用气体炮技术测定隔振器冲击特性[J]. 振动与冲击,2005,24(1):103-105.  
Weng Xue-tao, Huang Ying-yun, Zhu Shi-jian, et al. Measuring vibration isolator's shock characteristics by air gun[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005,24(1):103-105.
- [9] Graves T P, Hardy B, Williams R, et al. Light gas gun impact testing for the NASA space Shuttle[C]// 26th AIAA Applied Aerodynamics Conference. Honolulu, HI, United States, 2008.
- [10] 宣建明,缪彧,程军,等. 返回舱水上冲击特性的试验研究与理论计算[J]. 水动力学研究与进展:A,2000,15(3):276-286.  
Xuan Jian-ming, Miao Yi, Cheng Jun, et al. Tests and calculations of water impact characteristics of a recovery module[J]. Journal of Hydrodynamics: A, 2000,15(3):276-286.
- [11] 王永虎,石秀华. 入水冲击问题研究的现状与进展[J]. 爆炸与冲击,2008,28(3):276-282.  
Wang Yong-hu, Shi Xiu-hua. Review on research and development of water entry impact problem[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(3):276-282.
- [12] 侯金瑛,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-ying, 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.
- [13] 曾曙林,周梓荣. 水压冲击器的研究与开发[J]. 工程设计与建设,2003,35(1):38-41.  
Zeng Shu-lin, Zhou Zi-rong. Research and development of hydraulic impactor[J]. Engineering Design and Construction, 2003,35(1):38-41.

- [14] 梁艳,张英余,赵文强,等. 水压凿岩机的关键技术研究[J]. 煤矿机械,2011,32(6):70-72.  
Liang Yan, Zhang Ying-yu, Zhao Wen-qiang, et al. Research of key technology of hydraulic drill machine[J]. Coal Mine Machinery, 2011,32(6):70-72.
- [15] 马百双,刘昌锦. 几种典型炮口初速测试方法比较[J]. 四川兵工学报,2011,32(11):53-55.  
Ma Bai-shuang, Liu Chang-jin. Comparison with first speed measure method for some sorts of typical cannon[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2011,32(11):53-55.

## Device for ejecting water column by inertia effect based on load technology of gas gun\*

Liu Xian-jun, Wang Xiao-long, Li Si-zhong, Zhong Wei-zhou, Zhou Ben-quan  
(*Institute of System Engineering, China Academy of Engineering Physics,  
Mianyang 621999, Sichuan, China*)

**Abstract:** Based on load technique of gas gun and inertia projecting method, a device is developed to eject water column with desired speed and regular shape for hydraulic impact tests. Referring to piston push technology, this device used a projecting cylinder filled with water to replace piston. Under huge push of gas gun, the cylinder is accelerated and will impact buffer when arriving to desired speed, then water column in the cylinder will be ejected under inertial function because the cylinder suddenly halts. The cylinder is made of alloy steel of high strength, and can be used again after impacting buffer made of rubber material. Using this device, water column with regular shape( $\varnothing 200\text{ mm}\times 1\text{ m}$ ) is ejected, and satisfied requirement of hydraulic impact tests. Ejecting speed is gained by photoelectric measurement method, corresponding to results of theoretic calculation.

**Key words:** mechanics of explosion; projecting cylinder; gas gun; inertia effect; device for ejecting water column; cushion; photoelectric testing velocity

---

\* Received 22 November 2012; Revised 29 May 2013

Corresponding author: Liu Xian-jun, liuxianjun\_job@163.com