

反应气体驱动二级轻气炮发射特性实验及数值计算

董 石,孟川民,谷 伟,彭旭升,张波涛,肖元陆,方茂林,向耀民,王 翔

引用本文:

董石,孟川民,谷伟.反应气体驱动二级轻气炮发射特性实验及数值计算 [J].高压物理学报,2018,32 (5):053201.

DONG Shi, MENG Chuanmin, GU Wei. Experiment and Numerical Calculation on Launching Performance of Two-Stage Light Gas Gun Driven by Gas Reaction [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(5):053201.

当期更多内容≫

您可能感兴趣的其他文章:

反应气体驱动二级轻气炮技术的初步研究 董石,孟川民,肖元陆,莫俊杰,张明建,王翔,施尚春 DOI: 10.11858/gywlxb.2017.02.011

三级炮超高速发射技术研究进展 王青松,王翔,郝龙,戴诚达,柏劲松,谭华 **DOI**: 10.11858/gywlxb.2014.03.012

三级炮加载技术在超高压状态方程研究中的应用 王青松,王翔,戴诚达,柏劲松,谭华,胡建波 DOI: 10.11858/gywlxb.2010.03.005

动态发射率与辐射亮度同时测量实验中的时间精确同步技术 刘盛刚,李加波,李俊,薛桃,王翔,翁继东,李泽仁 DOI: 10.11858/gywlxb.20170634 DOI: 10.11858/gywlxb.20180528

反应气体驱动二级轻气炮发射特性 实验及数值计算^{*}

董 石,孟川民,谷 伟,彭旭升,张波涛,肖元陆,方茂林,向耀民,王 翔 (中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室,四川 编阳 621999)

摘要:通过实验确定了 20/57 mm 构型反应气体驱动二级轻气炮的气体装填参数与弹丸 动能的关系。实验结果表明,反应气体驱动二级轻气炮的弹丸动能与气体反应化学能之间基 本满足二次函数关系,系统发射稳定性满足加载实验要求。发展了基于气体爆轰模型的计算 方法,通过数值计算获得了反应气体驱动二级轻气炮的发射特性,弹丸速度的计算结果与实测 结果吻合较好。

反应气体驱动二级轻气炮相对于传统火药驱动二级轻气炮具有燃气的平均分子质量小、声速高、发 射能力强的特点,且在运行过程中无需硝化棉、火帽、黑火药等火工品,不会产生大量有毒有害气体,是 一种适应性优良、环境友好、高效的驱动技术,具有广泛的应用前景。中国工程物理研究院流体物理研 究所开展了反应气体驱动二级轻气炮的初步实验研究,获得了 5.6 km/s 的发射能力^[1]。对于实际应用 而言,气炮系统的发射特性是必须获取的数据,关系到系统的整体设计和优化。到目前为止,人们对基 于火药驱动的二级轻气炮发射特性开展了大量的研究工作^[2-6],而对于反应气体驱动二级轻气炮系统的 发射特性实验及内弹道计算却未见公开报道。本研究在前期工作的基础上通过实验确定反应气体驱动 二级轻气炮气体装填参数与弹丸速度的关系,并通过数值方法对二级轻气炮活塞及弹丸的内弹道特性 进行计算,获取相关参数,以期为新型反应气体驱动二级轻气炮技术优化和应用提供参考。

1 实验方法与结果

本实验在中国工程物理研究院流体物理研究所的 20/57 mm 构型(发射管直径 d 和泵管直径 D 分 别为 20 和 57 mm)反应气体驱动二级轻气炮原型装置^[1]上完成。实验时,根据需要在反应室中加注适 当摩尔比的可燃气体、工质气体及氧气,采用压力传感器监测反应室气压,根据分压定理计算组分气体 的质量。气体加注完成后,采用输出能量为 4 J 的高能热爆丝点火,引发反应室内可燃气体和氧气反应 释放能量,使反应室内气体达到高温高压状态,推动活塞压缩泵管中氢气,进而加速弹丸至数千米每秒 的速度。

弹丸炮口速度采用激光束遮断(Optical Beam Breakout,OBB)法^[1]测量,气体反应总释放能量根据 可燃气体氧化反应方程式计算得到。本实验中,可燃气体为氢气,工质气体为氮气,氢气和氧气采用摩 尔比 2:1 加注,氢氧反应激发能仅为 0.02 mJ,以氢氧完全反应计算释放的化学能。实验结果列于 表 1,其中 m_p、u_p 和 E_p分别为弹丸的质量、速度和动能,E_c为气体反应化学能。

^{*} 收稿日期: 2018-03-21; 修回日期: 2018-06-19

基金项目:国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院 NSAF 联合基金(U1230201)

作者简介: 董 石(1967-), 男, 主要从事动高压实验技术研究. E-mail: stones1967@126. com

通信作者: 王 翔(1968-),男,研究员,主要从事动高压实验技术研究. E-mail:xiangwang_102@126.com

表 1 20/57 mm 反应气体驱动二级轻气炮实验数据

Table 1	Experime	ental details	of 20/57 mm	two-stage ligh	t gas gun driv	en by reactive gas
No.	D/mm	d/mm	$m_{ m p}/{ m g}$	$E_{ m c}/{ m MJ}$	$E_{\rm p}/{ m MJ}$	$u_{\rm p}/({\rm km} \cdot {\rm s}^{-1})$
1	57	20	8.06	3.52	0.128	5.64
2	57	20	9.47	2.59	0.097	4.52
3	57	20	9.21	2.59	0.101	4.70
4	57	20	9.30	2.52	0.097	4.57
5	57	20	9.25	2.16	0.066	3.78
6	57	20	9.25	1.73	0.038	2.82

实验中弹丸质量存在少许差异,为了便于比较, 以弹丸炮口动能作为表征参数与气体反应化学能关 联,如图1所示。可见,气体反应化学能 E。与弹丸 动能 E_p 呈二次函数关系;在低装填参数情况下,弹 丸动能随着化学能增长而明显增大;但在较高装填 参数情况下,弹丸动能增加速率明显放缓,这是由二 级轻气炮的驱动原理决定的,即受推动弹丸的高温 高压氢气的逃逸速度极限所限;随着弹丸动能的增 加,弹丸速度逐步逼近系统的内弹道极限,此时即便 减轻弹丸质量,增加驱动化学能,也无法显著提高弹 丸速度。在破膜压力、活塞质量等其他运行条件基 本相同的情况下,对于本研究的二级轻气炮系统,气



Fig. 1 Kinetic energy of projectile vs. chemical energy

体反应化学能与弹丸动能之间的关系可以用下式较好地拟合

 $E_{p} = -0.195 + 0.173E_{c} - 0.023E_{c}^{2}$ 0.038 MJ < E_{p} < 0.128 MJ (1) 为了验证系统发射稳定性,进行了相同化学能条件下的多发实验,在化学能为 2.59 MJ 左右的条件 下,弹丸出口动能相差不超过 5%,说明该系统的稳定性及重复性较好,满足加载实验要求。

2 数值计算

反应气体驱动二级轻气炮结构如图 2 所示,发射过程如下:反应室内气体反应释放能量,高温高压 气体冲破膜片 1 推动活塞运动并压缩泵管中氢气;泵管中氢气达到一定压力(由膜片 2 的破膜压力决 定)时,膜片 2 破裂,高温高压氢气推动弹丸运动直至发射过程结束。这是一个多级耦合过程,在计算中 需要将活塞前后气体状态以及活塞、弹丸的运动状态联立,交替解算直至发射过程结束。



图 2 反应气体驱动二级轻气炮结构示意

Fig. 2 Structure of two-stage light gas gun driven by reactive gas

基于火药驱动的二级轻气炮内弹道计算方法已较为成熟。本计算与传统火药驱动二级轻气炮内弹 道计算的不同之处在于反应室(火药室)气体状态的处理方法。在火药驱动二级轻气炮内弹道模拟中, 活塞的运动从膜片1破裂后(取决于预设的膜片破裂压力)开始,此时火药室内火药有可能尚未燃尽,剩 余火药在变容条件下继续燃烧产生燃气并推动活塞运动,这种情况可采用较成熟的火炮内弹道计算方 法计算。气体反应存在燃烧、爆轰等情况。在燃烧情况下,由于燃烧火焰阵面的传播速度较慢,反应室 内燃气压力取决于膜片1的破膜压力,膜片1的强度越强,破膜压力越高,燃烧越接近完全,燃气压力和 温度亦越高;与燃烧情况不同,自持爆轰不受外界因素影响,爆轰驱动强度与膜片1的强度无关^[7],即以 爆轰波阵面为间断面,反应室气体爆轰波前压力和温度保持初始状态,直至爆轰波阵面到达膜片使膜片 破裂,膜片强度对气体参数不产生影响,膜片仅起到气体加注过程中的密封作用。本实验中氢气和氧气 以反应当量比混合,在高能热爆丝点火条件下形成爆轰,这种情况在高焓激波管实验中已有类似报 道^[7]。基于此,在反应室气体状态计算中采用以下近似处理:(1)气体反应完成前,反应室膜片保持完 整,反应室气体反应完成后,膜片瞬间破裂;(2)反应室破膜后,高温高压气体以等熵膨胀方式推动活 塞;(3)工质气体不参与反应。

根据范德瓦尔斯气体状态方程计算反应室气体状态参数。气体等熵膨胀驱动活塞过程中,反应室 气体压力可表示为

$$p_{\rm c} = p_0 \left(\frac{V_{\rm c}}{V_{\rm c} + SL} \right)^{k_0} \tag{2}$$

式中:p。和 p。分别为计算时刻和反应终止时反应室气体压力;S为泵管截面积;L为活塞运动距离;V。 为反应室容积;k。为反应终止时反应室气体绝热指数,由反应后组分气体相关参数加权平均计算得到。 在忽略摩擦的条件下,活塞的加速度 a 为

$$a = \frac{(p_{\rm c} - p_{\rm p})S}{m + m_{\rm add}} \tag{3}$$

式中: *p*_p 为计算时刻与活塞接触计算单元的氢气压力, *m* 为活塞质量, *m*_{add} 为反应室气体进入泵管带来的附加质量^[8]。

$$m_{\rm add} = 0.6SL\rho_0 \left(\frac{p_{\rm c}}{p_0}\right)^{1/k} \tag{4}$$

式中:po 为反应室气体密度,k 为氢气绝热指数。

泵管至弹丸部分的计算主要借鉴现有二级轻气炮计算中的"Q"方法,即在拉格朗日坐标下一维流体动力学方程组的压力中加入 Von Neumann 形式的人工黏性项 Q,以处理激波间断问题,差分格式采用二阶 MacCormack 格式。氢气的状态方程采用

$$e = \frac{p}{k-1} \left(\frac{1}{\rho} - a_r \right) \tag{5}$$

式中:p、p、u、e、a,分别为氢气的压力、密度、质点速度、比内能和余容。

当泵管长度为 8 m、发射管长度为 6 m、高压室 锥角为 8°、膜片 2 的破膜压力为 100 MPa(取自文 献[9])时,采用以上方法进行内弹道计算,结果见 表 2,其中 v_p为活塞速度最大值,*p*g 为泵管初始气 体压力。图 3 给出了不同化学能及反应室容积条件 下弹丸速度计算值与实验值的比较。

需要说明的是,表2中对于反应室容积为7.3L 的实验,由于反应室容积减小,若保持总化学能为 2.5 MJ,需提高反应室的初始压力,而反应室初始 压力的提高将增大对活塞的驱动能力,活塞速度及 弹丸速度应高于相同化学能情况下反应室容积为 10.0 L 时的参数,计算结果也符合此规律;但是,此 发实验采用在大容积反应室中填充金属管状构件方





式减小容积,金属构件的引入可能对反应室中的气体反应产生影响,并增加新的能量耗散,导致活塞和 弹丸的实际速度低于计算值。

$V_{\rm c}/{ m L}$	$p_{\rm g}/{ m MPa}$	$E_{\rm c}/{ m MJ}$	$v_{\rm p}/({\rm m} \cdot {\rm s}^{-1})$	m/kg	$m_{ m p}/{ m g}$	u _p						
						Exp. / (km \cdot s ⁻¹)	Calc. /(km \cdot s ⁻¹)	Error/%				
10.0	1.3	3.52	620	2.0	8.06	5.64	5.41	-4.07				
10.0	1.5	2.59	474	2.0	9.47	4.52	4.48	-0.89				
10.0	1.5	2.59	474	2.0	9.21	4.70	4.51	-4.04				
7.3	1.5	2.52	585	2.0	9.30	4.57	4.77	4.38				
10.0	1.5	2.16	408	2.0	9.25	3.78	3.84	1.59				
10.0	1.5	1.73	331	2.0	9.25	2.82	2.89	2.48				

表 2 计算弹速与实测弹速比较 Table 2 Comparison of calculated velocity with experimental data

由表 2 可知,不同初始装填条件下,弹丸速度的计算值与实测值符合较好,相对误差在 5%以内,说 明采用本计算方法可以基本反映反应气体驱动二级轻气炮发射内弹道特性,从而有助于反应气体驱动 二级轻气炮的结构设计及调试。

3 结 论

实验测量了 20/57 mm 型反应气体驱动二级轻气炮的驱动特性,结果表明:弹丸出口动能与反应化 学能的关系满足二次函数关系,系统稳定性及内弹道重复性满足加载实验要求。发展了基于气相爆轰 模型的内弹道计算方法,计算弹速与实验弹速符合较好,相对误差不超过 5%,表明所采用的计算方法 可基本反映反应气体驱动二级轻气炮的发射特性。研究结果对基于反应气体驱动这一新型驱动方式的 二级轻气炮结构设计及内弹道特性研究具有参考意义。

参考文献:

- [1] 董石,孟川民,肖元陆,等.反应气体驱动二级轻气炮技术的初步研究 [J].高压物理学报,2017,31(2):182-186.
 DONG S, MENG C M, XIAO Y L, et al. Preliminary study of two-stage light gas gun using reactive gas as driving energy [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2017,31(2):182-186.
- [2] 管小荣,徐诚.结构与装填条件对二级轻气炮发射性能的影响[J].弹道学报,2005,17(2):74-79.
 GUAN X R,XU C. The effects of geometry and loading conditions on launching performance of two-stage light-gas gun [J]. Journal of Ballistics,2005,17(2):74-79.
- [3] 吴应湘,郑之初,KUPSCHUS P. 二级轻气炮发射性能的数值模拟 [J]. 中国科学(A 辑),1995,25(4):374-384.
 WU Y X,ZHENG Z C,KUPSCHUS P. Numerical simulation on launching performance of two-stage light gas gun [J]. Science in China (Series A),1995,25(4):374-384.
- [4] 管小荣,徐诚. 二级轻气炮发射过程数学模型和计算方法 [J]. 南京理工大学学报(自然科学版),2007,31(1):22-26.

GUAN X R,XU C. Mathematical model and computing method for launch process of two-stage light-gas gun [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science),2007,31(1):22-26.

- [5] 梁世昌,黄洁,李毅,等. 二级轻气炮内弹道数值计算研究 [J]. 气体物理:理论与应用,2012,7(4):81-84.
 LIANG S C, HUANG J, LI Y, et al. Numerical research on interior ballistic of two-stage light gas-gun [J]. Physics of Gases: Theory and Applications,2012,7(4):81-84.
- [6] 黄洁,梁世昌,李海燕,等. 二级轻气炮发射过程内弹道数值计算研究 [J]. 空气动力学学报,2013,31(5):657-661. HUANG J.LIANG S C.LI H Y. et al. Numerical research on interior ballistics of the launch process of two-stage

light gas gun [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2013, 31(5):657-661.

- [7] 俞鸿儒,李斌,陈宏.激波管氢氧爆轰驱动技术的发展进程[J].力学进展,2005,35(3):315-322.
 YU H R,LI B,CHEN H. The development of gaseous detonation driving techniques for a shock tube [J]. Advances in Mechanics,2005,35(3):315-322.
- [8] 林俊德. 非火药驱动的二级轻气炮的发射参数分析 [J]. 爆炸与冲击,1995,15(3):229-240.
 LIN J D. A analysis of launching parameters for a two-stage light gas gun not driven by powder [J]. Explosion and Shock Waves,1995,15(3):229-240.
- [9] 王金贵. 二级轻气炮超高速弹丸发射技术的研究 [J]. 高压物理学报,1992,6(4):264-272.
 WANG J G. The launching technique of hypervelocity projectiles in two-stage light gas gun [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,1992,6(4):264-272.

Experiment and Numerical Calculation on Launching Performance of Two-Stage Light Gas Gun Driven by Gas Reaction

DONG Shi, MENG Chuanmin, GU Wei, PENG Xusheng, ZHANG Botao, XIAO Yuanlu, FANG Maolin, XIANG Yaomin, WANG Xiang

(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: In this paper, the launching performance of a developed 20/57 mm two-stage light gas gun was studied, of which the driving energy is supplied by the gaseous chemical reaction. The experimental results show that the relationship between the chemical energy and the kinetic energy of the projectile can be properly fitted with quadratic polynomials. The tests conducted under controlled repeatable conditions indicate good repeatability of system, thus verifying that the system satisfies the requirement of the loading experiments. In addition, we developed a ballistic model of the two-stage light gas gun driven by gas reaction, and calculated the velocities of projectiles, which are in good agreement with the experimental data.

Keywords: gas reaction; two-stage light gas gun; launching performance