

文章编号: 1001-4888(2010)03-0331-08

$\Phi 100/30\text{mm}$ 口径二级轻气炮研制^{*}

朱玉荣, 张向荣, 邵贤忠, 刘冠兰, 谭书舜, 景吉勇

(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: $\Phi 100/30\text{mm}$ 口径二级轻气炮主要用于 EFP(Explosively Formed Projectile 爆炸成形弹丸)、PELE(Penetrator with Enhanced Lateral Efficiency 横向效应增强型侵彻弹)、分段杆条等杀伤元件对各类目标毁伤机理及高应变率材料动态性能等领域的高速、超高速撞击实验研究。该气炮以 $\Phi 100\text{mm}$ 单级压缩气炮作为首级驱动, 加装可拆卸的 $\Phi 30\text{mm}$ 发射管, 实现了一、二级气炮的功能。本文主要介绍了该气炮的高压锥段、发射管、膜片及活塞等关键零部件的结构设计、调试及实验研究情况。目前该炮作为一级气炮已将 20kg 弹丸驱动到 349m/s, 1kg 弹丸驱动到 1157m/s; 作为二级气炮已将 100g 弹丸驱动到 3005m/s, 400g 弹丸驱动到 1520m/s。

关键词: 二级轻气炮; 高速撞击; 结构设计

中图分类号: O385; TJ301

文献标识码: A

0 引言

二级轻气炮是超高速弹丸驱动中应用最广泛的技术之一。国内的气炮是上世纪七十年代投产的, 但国内许多重要实验室的气炮并没有像国外那样在口径和弹速变化范围上形成完整配套。

几十年来, 太空航天器生存风险研究、穿甲武器研究、动能武器研究等等都极大推动着材料动力学研究工作的深入发展, 气炮实验手段就是在这种历史需求背景下迅速发展和普及起来的。传统的二级轻气炮大多是以火药爆燃来驱动活塞(首级驱动)的, 火药的使用使炮体结构和实验室附属设备变得复杂, 带来安全、污染、炮的清洁等许多麻烦。气体驱动气炮的研制弥补了火炮的不足。目前国内的气体驱动二级轻气炮在口径和弹速变化范围上逐渐形成规模: $\Phi 57/10\text{mm}$ 口径二级轻气炮可将 0.5g 弹丸驱动到 7.8km/s, $\Phi 57/14.5\text{mm}$ 口径二级轻气炮可将 1.5g 弹丸驱动到 6.4km/s, $\Phi 100/23\text{mm}$ 口径二级轻气炮可将 20g 弹丸驱动到 3km/s, $\Phi 100/30\text{mm}$ 炮是目前国内口径最大的气体驱动二级轻气炮。

1 工作原理

图 1 是 $\Phi 100/30\text{mm}$ 口径二级轻气炮的结构示意图。它由单级压缩气炮(首级驱动)、弹丸发射装置(二级驱动)、真空靶室和靶箱组成。图中虚框内为 $\Phi 100\text{mm}$ 口径首级驱动的压缩气炮, 弹丸发射装置(二级驱动)由二级气室(也称高压锥段)、膜片及其装夹机构、 $\Phi 30\text{mm}$ 发射管等组成。

工作原理: 一级气室内充入氮气或氦气, 快开锥阀打开后气体推动活塞前进, 泵管(一级炮发射管)抽真空后注入一定气压的氢气, 高速运动的活塞绝热压缩该气体使其在泵管末端形成一个新的高压气室, 当这个气室的气压超过膜片的承受能力后则破膜发射弹丸。

^{*} 收稿日期: 2009-10-20; 修订日期: 2009-12-02

通讯作者: 朱玉荣(1970—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事爆炸力学方面的研究工作。

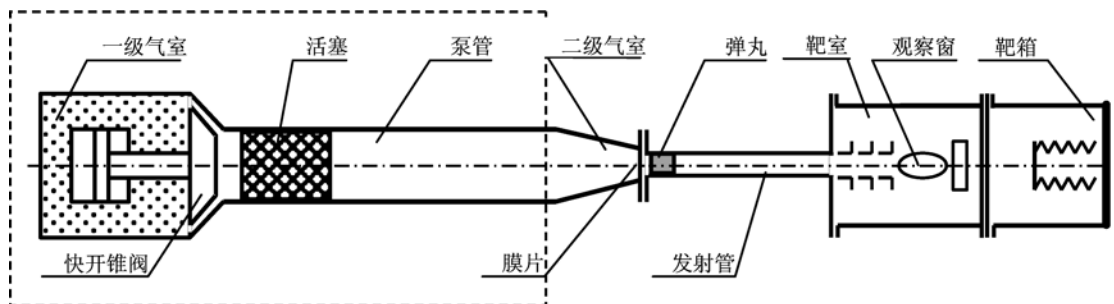


图 1 Φ100/30mm 二级轻气炮的结构示意图

Fig. 1 Structure of Φ100/30mm two stage light gas gun

2 相关参数设计

2.1 设计指标

一级:弹重 1kg 最高弹速为 1100m/s,弹重 20kg 最高弹速为 350m/s;泵管口径:Φ100mm;

二级:弹重 100g 最高弹速为 3000m/s,弹重 400g 最高弹速为 1500m/s;发射管口径:Φ30mm。

2.2 一级气室、泵管和活塞

一级气室容积和泵管长度按普通一级压缩气炮设计^[1],二级炮的弹丸最大动能 $E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 0.1 \times 3000^2 = 0.45 \text{ MJ}$ 。

表 1 20MPa 氮气驱动的活塞速度及其动能

Tab. 1 Velocity and kinetic energy of the piston when propelled by 20MPa Nitrogen

气室容积(cm^3)	泵管长度(m)	活塞质量(kg)	活塞速度(m/s)	活塞动能(MJ)
0.1	15	3	539	0.436
		12	339	0.690
	20	3	572	0.491
		12	368	0.813
0.2	15	3	543	0.442
		12	351	0.739
	20	3	578	0.501
		12	381	0.871

由表 1 可以看出:活塞动能随气室容积、泵管长度和活塞质量的增大而增大,气室容积由 0.1m^3 增大到 0.2m^3 时,活塞动能增大 2%~7%,活塞质量由 3kg 增大到 12kg 时,活塞动能增大 50%~66%,泵管长度由 10m 增大到 20m 时,活塞动能增大 37%~51%。

气室容积增大获得的活塞动能增大量相当有限,而且会影响实验效率和实验成本,因此气室容积取为 0.1m^3 比较合适。

泵管长度和活塞质量的增大可以明显提高活塞动能,一级驱动以满足活塞动能大于弹丸动能为度,因此泵管长度取 20m、活塞质量取 12kg 能够满足 Φ100/30mm 炮的弹速指标要求。

表 2 是气室容积取为 0.1m^3 、泵管长度取 20m、活塞质量取为 12kg、泵管初压为 0.3MPa 氢气的 Φ100/30mm 二级气炮发射参数的理论计算结果。图 2 为 25MPa 氮气驱动的 Φ100/30mm 二级气炮发射参数变化过程。

表 2 氮气驱动的 Φ100/30mm 气炮计算弹速与高压气室气压峰值

Tab. 2 Theoretical velocity and gas pressure in high pressure vessel of Φ100/30mm gas gun when propelled by Nitrogen

弹丸质量(g)	发射管长度(m)	驱动气压(MPa)	活塞速度(m/s)	弹速(m/s)	气室峰压(MPa)
100	6	15	279	2052	92
		20	320	2516	163
		25	354	2927	254
	7	15	279	2216	92
		20	320	2698	163
		25	354	3111	254
400	6	15	279	1086	139
		20	320	1302	253
		25	354	1478	399
	7	15	279	1126	139
		20	320	1339	253
		25	354	1513	399

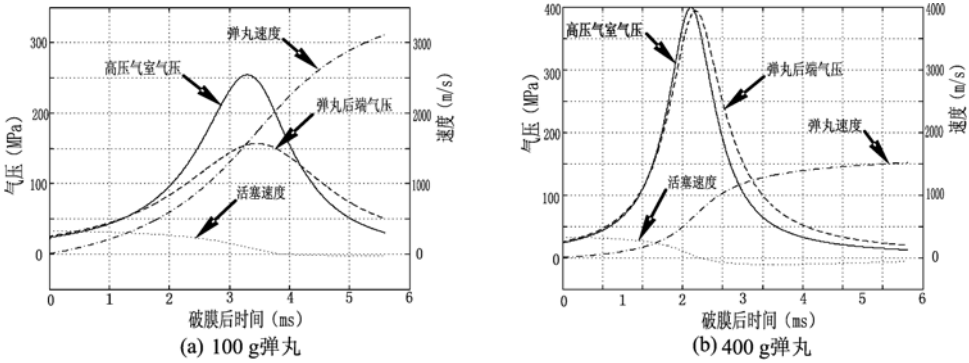


图 2 25MPa 氮气驱动的 Φ100/30mm 二级气炮发射参数变化过程

Fig. 2 Changing process of Φ100/30mm two stage gas gun's experiment parameter when propelled by 25MPa

3 二级轻气炮关键部件设计

3.1 发射管

发射管内径选取 Φ30mm 是为了满足破片撞击实验要求。理论计算和实验都表明：当发射管长度 $L > 200d$ (d 为发射管口径) 之后，弹速的提高是很有限的^[2]。所以现有的气炮发射管长度都取 $L = 200d \sim 300d$ 。本炮发射管长度为 7m。考虑工艺难度和造价等实际情况，发射管做成两节，靠法兰连接，中间采用紫铜密封圈保证了炮管连接后的密封。两发射管间靠止口保证连接后的同轴度要求，为此要求各管内孔最大制造公差不得超过 0.03mm，光洁度为 R0.4 以上。除此之外，发射管连接后必须有足够的直线度，要求用长度为发射管内径 5~8 倍的标准样棒进行通过检验。样棒直径小于发射管内径 0.02~0.05mm。

3.2 二级气室及其连接

二级气炮泵管与发射管之间大多采用锥形过渡形成二级气室，高压锥段都做成圆锥形，对于 Φ100/30mm 气炮，减少活塞变形能，提高对首级驱动能的利用效率比减少冲击更重要，综合权衡取高压段锥角 $\phi = 32^\circ$ 。高压段管段的外径是按塑性变形不扩展到外表面设计的，平面应变状态下的厚壁圆筒极限承压能力为^[3]：

$$P_s = \sigma_s \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

其中, P_s 为极限压力; σ_s 为材料的屈服极限; a, b 分别为圆筒的内、外半径。

据此取 $b=140\text{mm}$, $a=15\text{mm}$, $\sigma_s=800\text{MPa}$ 的情况下, 其最大承压能力为 $P_s=1786\text{MPa}$, 考虑到三维效应和瞬时加载对屈服限的提高, 实际承压能力会有所提高。Φ100/30mm 二级气炮的设计弹重为 100~400g, 设计弹速为 1500~3000m/s, 计算的高压锥段最大气压不超过 400MPa^[4], 所以可以满足高压段的承压能力要求。

由于大锥角的设计会造成活塞对高压段的较大冲击, 冲击力最终将传递到 Φ100mm 一级炮的基座, 而这个冲击力将远远超过 Φ100mm 炮基座的设计能力。因此泵管与高压锥段之间设计有效的缓冲装置, 减小传递到 Φ100mm 炮基座的推力。如图 3 所示的泵管同二级气室和发射管之间的缓冲装置, 缓冲主要靠橡胶缓冲垫实现。

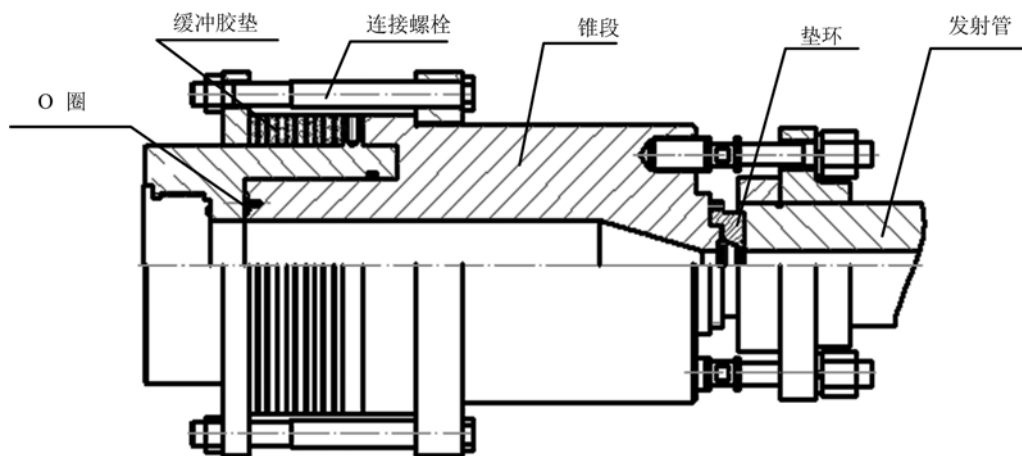


图 3 泵管、高压锥段、发射管之间的连接示意图

Fig. 3 Structure of junction among pump tube, high pressure vessel and launch tube

3.2.1 连接螺栓

设计 M36×2 连接螺栓, 材料为 42CrMo, 调质处理的屈服强度 $\sigma_s=930\text{MPa}$, 螺栓中间加工一段长度为 100mm, 直径为 Φ33mm 的圆柱段(30°角过渡), 使螺钉断裂前必然先出现明显塑性变形, 引起警觉。螺栓最小直径为 Φ33mm, 截面积 $S=855\text{mm}^2$, 安全系数 $S_s=2$ 。四个连接螺栓的允许拉力为:

$$F = \frac{\sigma_s}{S_s} \cdot S = 1.5\text{MN}.$$

3.2.2 橡胶缓冲垫

橡胶缓冲垫厚度 $h=0.1\text{m}$, 外半径 $R=0.2\text{m}$, 内半径 $r=0.135\text{m}$, 选用中等硬度的橡胶板。锥段质量 $M_1=280\text{kg}$, 发射管总质量 $M_2=860\text{kg}$, $M=M_1+M_2=1140\text{kg}$ 。 $m=12\text{kg}$ 活塞的最大发射速度 $v=400\text{m/s}$, 活塞动量 $i=4800\text{kg} \cdot \text{m/s}$, 假设活塞动量全部传递给锥段, 锥段的速度和动能为:

$$V = \frac{m \cdot v}{M} = \frac{12 \times 400}{1140} = 4.2(\text{m/s})$$

$$E = \frac{M \cdot V^2}{2} = \frac{1140 \times 4.2^2}{2} = 10.1(\text{kJ})$$

假设缓冲橡胶垫的总压缩量为 X , 螺钉的最大拉力为 F , 根据弹性变形的能量守恒可得:

$$E = \frac{1}{2} \cdot X \cdot F$$

$$X = \frac{2 \cdot E}{F} = \frac{2 \times 10.1 \times 10^3}{1.5 \times 10^6} = 13\text{mm}$$

根据计算缓冲橡胶垫厚度约 100mm, 压缩量可以达到 30mm~50mm, 只要在达到最大压缩量之

前,橡胶垫抗力能够达到 150 吨力,就可以认为是安全的。

3.3 膜片、活塞的设计

在高压锥段和发射管之间加一隔离膜片^[5],当高压锥段的压力达到预定值时,膜片破裂,弹丸开始启动。膜片的要求包括开启时间短和不能有金属碎片脱落。我们设计了平板膜片,膜片上有十字形槽,以利于膜片破裂,结构如图 4 所示。膜片材料采用了抗拉、抗剪切和韧性好的奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti。

活塞起到将一级气室高压气体能量传递到泵管中的轻质气体并在锥形高压气室形成高压、高温,大幅度提高泵管内轻质气体的音速的目的。根据理论计算和数值分析^[6],选定活塞的质量为 12kg,结构如图 5 所示,由防止烧蚀汽化的高强度铝青铜和聚乙烯组成,通过 45°倒角实现活塞的双向密封,防止发射过程中驱动活塞的气体污染泵管的轻质气体和高压气室轻质气体从活塞向后泄漏。

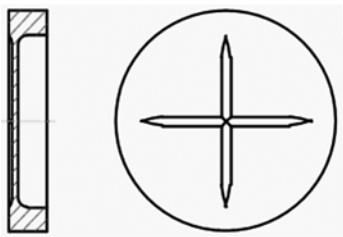


图 4 膜片
Fig. 4 Diaphragm

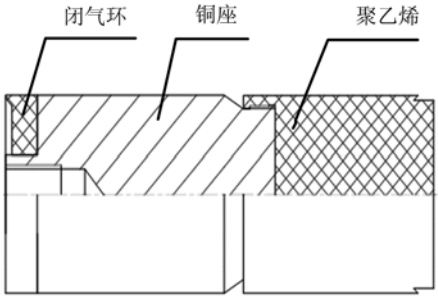


图 5 活塞结构
Fig. 5 Structure of piston

4 弹速测量系统

本装置采用了激光光束遮断的测量装置。激光光束遮断法测速原理是弹丸飞行时依次遮断布置在弹道上的三束平行激光,对应的接收光敏管因此产生电信号,由此测出遮光的时间间隔,再根据事先精确测量的激光间距,则可求出弹丸的出口速度。

5 调试实验

利用该气炮进行了 10 发调试实验,一级炮 4 发,二级炮 6 发,实验数据见表 3 和表 4。其中,二级炮实验弹如图 6 所示,图 7 为二级炮实验(弹重:400g,速度:1520m/s)的速度波形和靶板破坏情况;一级炮实验弹如图 8 所示,图 9 为一级炮实验(弹重:20kg,速度:349 m/s)的速度波形和靶板破坏情形。

表 3 Φ100/30mm 口径二级气炮调试实验数据

Tab. 3 Data of the Φ100/30mm two stage light gas gun's testing experiment

编号	发射参数				实测弹速 (m/s)
	活塞重量 M(kg)	弹丸质量 m(g)	气室压力 P_o/N_2 (MPa)	泵管压力 P_p/H_2 (MPa)	
1 [#]	12	100	8	0.3	1538
2 [#]	12	100	15	0.3	2408
3 [#]	12	100	15	0.3	2420
4 [#]	12	100	22	0.3	2811
5 [#]	12	100	21	0.3	3005
6 [#]	12	400	20	0.3	1520

表 4 100 一级气炮发射参数

Tab. 4 Data of 100mm one stage light gas gun's testing experiment

编号	发 射 参 数		实测弹速(m/s)
	弹重 M(kg)	气室压力 P_o (MPa)	
7 [#]	1	15, N ₂	692
8 [#]	1	15, N ₂	695
9 [#]	1	22, He	1157
10 [#]	20	20, He	349

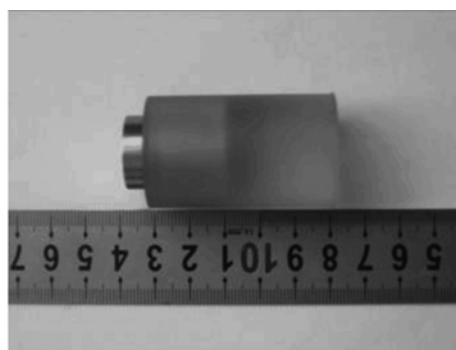
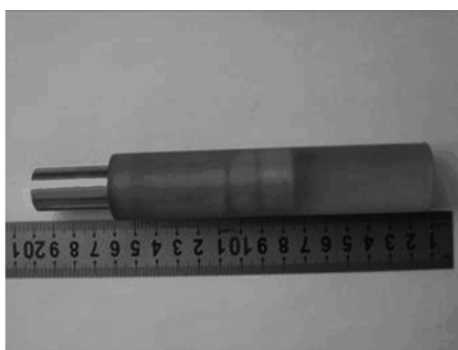


图 6 二级炮所用两种弹(包含弹托总重分别为 400g、100g)

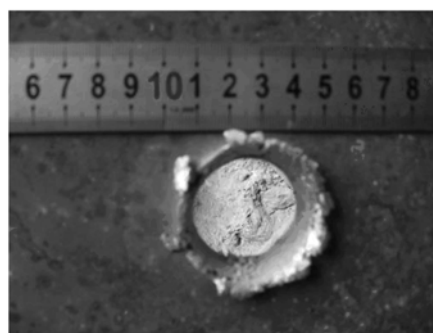
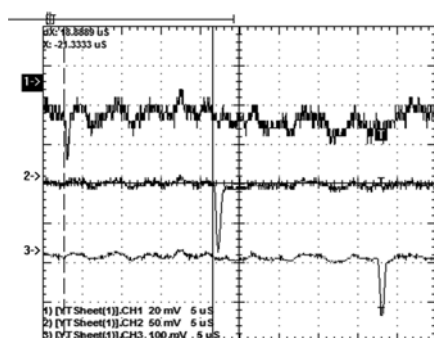
Fig. 6 The two projectiles used on two stage light gas gun
(having contained the sabot, whose weight is 400g or 100g respectively)图 7 6[#] 实验测速波形及靶板破坏情况

Fig. 7 Velocity's waveform and impact fracture in the target in the sixth experiment

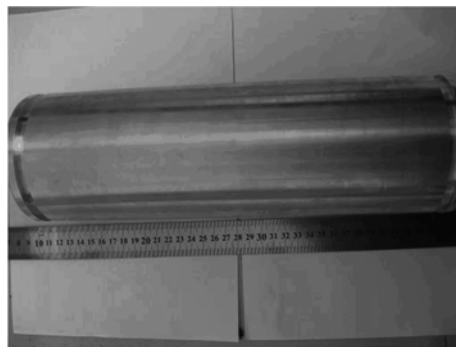
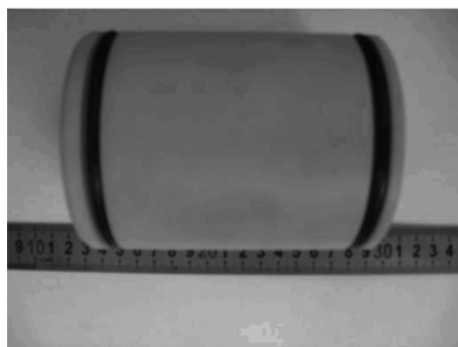


图 8 一级炮所用弹(重量分别为 1kg、20kg)

Fig. 8 The two projectiles used on one stage light gas gun (whose weight is 1kg or 20kg respectively)

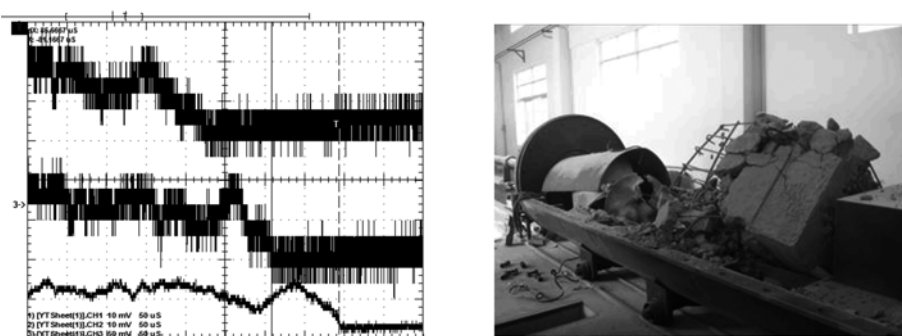
图9 $10^\#$ 实验测速波形及靶破坏情况

Fig. 9 Velocity's waveform and impact fracture in the target in the sixth experiment

6 实验研究

利用该一、二级炮分别完成了 $\Phi 70\text{mm}$ 侵彻爆破弹侵彻性能实验和长杆侵彻体侵彻均质装甲试验, 达到了研究负载对长杆侵彻体的侵彻威力影响的目的。图 10 为一级炮实验用弹, 图 11 为二级炮实验用弹。

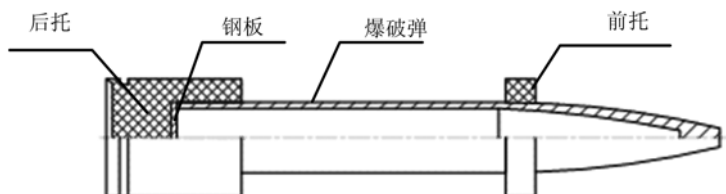


图10 一级炮实验弹

Fig. 10 The cut-and-try projectile used on one stage light gas gun



图11 二级炮实验弹

Fig. 11 The cut-and-try projectile used on two stage light gas gun

7 结论

本气炮采用较大锥角的二级气室、较高的泵管初充气压、平膜片、组合式活塞成功地提高了首级驱动能的利用效率, 缓冲装置有效的降低了发射冲击力。实验表明: 该气炮设计合理, 安全可靠。

目前该炮作为一级气炮已将 20kg 弹丸驱动到 349m/s , 1kg 弹丸驱动到 1157m/s 。作为二级气炮已将 100g 弹丸驱动到 3005m/s , 400g 弹丸驱动到 1520m/s 。

该炮从驱动能力来看仍有潜力, 只是由于弹丸的脱壳问题限制了部分实验的开展, 因此不同形状弹丸的脱壳技术研究将是下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] Seigel A E. The theory of high speed gas guns [R]. AD-475660, 1965:10—11.
- [2] 徐秉业, 刘信声. 应用弹塑性力学[M]. 清华大学出版社, 1999:196 (Xue Bingye, Liu Xinsheng. Applied Elastic-plastic Mechanics[M]. Publishing Company of Tsinghua University 1999:196(in Chinese))
- [3] 林俊德. 57-10 二级气炮物理设计[R]. 西安:西北核技术研究所. 2001:1—3 (Lin Junde. Physical Design of 57-10

- two-stage Light Gas Gun[R]. Northwest Institute of Nuclear Technology, 2001:1—3(in Chinese))
- [4] 张德志. 新型气体驱动二级轻气炮研制[R]. 西安:西北核技术研究所, 2004:14—18 (Zhang Dezhi. Development of a New Type Gas-Driven two-stage Light Gas Gun[R]. Northwest Institute of Nuclear Technology, 2004:14—18 (in Chinese))
- [5] 林俊德. 非火药驱动二级轻气炮发射参数分析[J]. 爆炸与冲击 E, 1995, 15(3):229—240 (Lin Junde. A Analysis of Launching Parametrs for a two Stage Light Gas Gun not Driven by Powder. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(3):229—240(in Chinese))

On the Development of a $\Phi 100/30$ mm-Caliber Gas-driven Two-stage Light Gas Gun

ZHU Yu-rong, ZHANG Xiang-rong, SHAO Xian-zhong,
LIU Guan-lan, TAN Shu-shun, JING Ji-yong
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: $\Phi 100/30$ mm-caliber two stage light gas gun is mainly used in high velocity and hypervelocity impact experiments in the area such as dynamic performance of materials subjected to high strain rate and damage mechanism of kinds of target shot by EFP (Explosively Formed Projectile), PELE (Penetrator with Enhanced Lateral Efficiency) and pole of several segments and so on. The device is made up of a 100mm-caliber compressed gas gun as the first-stage drive and a 30mm-caliber launch tube, which can be disassembled, so it can be used as a one-stage or a two-stage light-gas gun. This article mainly presented not only the machinery design of the device's key parts such as high pressure vessel, launch tube, diaphragm and piston, but also adjusting method and some experiments as its application. Now, when the gas gun is used as a one stage light gas gun, it can propel an 20kg projectile to a velocity of 349m/s or propel an 1kg projectile to a velocity of 1157m/s; when it is used as a two stage light gas gun, it can propel an 100g projectile to a velocity of 3005m/s or propel an 400g projectile to a velocity of 1520m/s.

Keywords: two stage light gas gun; high velocity impact; machinery design