

文章编号: 1001-1455(2012)05-0483-07

超高速撞击实验的三级压缩气炮技术*

林俊德, 张向荣, 朱玉荣, 刘文祥
(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 介绍了弹速 8 km/s、氮气驱动三级压缩气炮技术的研究背景。论述了以三级压缩替代二级压缩在提高氮气驱动多级气炮上限弹速方面的意义。讨论了弹径 10 mm 的 57-37-10 三级气炮的驱动气压、泵管初充气压与发射弹速及高压气室荷载之间的关系。简述了 57-37-10 三级压缩气炮主要部件的工程设计, 通过实验数据和实物照片表述了 57-37-10 三级压缩气炮研究工作的进展情况。

关键词: 爆炸力学; 高速撞击; 发射技术; 三级压缩气炮

中图分类号: O381

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

气炮是一种通过发射高速弹体撞击靶面实现冲击荷载的力学实验设备。当前被广泛应用的气炮是一级气炮和二级气炮, 一级气炮采用压缩氮气或压缩氦气驱动弹体, 最大弹速可达 1.5 km/s 左右, 主要用于材料的动力学性能实验和各种弹体的动能侵彻实验; 二级气炮由两座一级炮串联而成, 通过活塞把第 1 级气炮的驱动能量传递给第 2 级气炮, 最大弹速可以达到 8~10 km/s, 主要用于空间科学研究的超高速撞击实验和动高压物理研究的物质状态方程实验。

二级气炮的第 1 级通常采用火药爆燃驱动方式, 火药的能量密度大, 以火药作为驱动能源的二级气炮结构比较紧凑, 但是存在环境污染和火工品安全管理问题。十多年前, 西北核技术研究所成功建立了以压缩氮气代替火药驱动的二级气炮驱动技术^[1], 改善了应用二级气炮的环保和安全条件, 此技术先后在大学与兵器工业研究所的 5 座二级气炮建造中得到了应用。

与火药驱动的二级气炮相比, 在弹速超过 6 km/s 的发射实验中, 压缩氮气驱动的二级气炮存在驱动能量不足的缺点, 虽然通过提高驱动气压、增大气室容积和改用氦气驱动的方法可以提高压缩气炮的驱动能量, 但是设备建造费用和实验运行成本都会因此迅速提高, 推广应用仍有困难。西北核技术研究所曾经在气炮的活塞设计、弹丸设计和发射参数优化等方面开展研究工作, 使氮气驱动的 57-10 二级压缩气炮的发射弹速达到 8 km/s 以上, 但是付出了发射管严重烧蚀扩孔的沉重代价, 因此至今 57-10 二级压缩气炮还未能提供弹速到达 8 km/s 的实验服务。

空间碎片撞击航天器的最大速度可以达到 14 km/s, 平均撞击速度约 9 km/s^[1]。空间碎片对航天器的破坏效果是随碎片质量、碎片材料、碎片形态、撞击角度和撞击速度而变化的, 航天器的防护层设计及其防护能力的科学考核是一个十分复杂的课题, 需要依靠深入的超高速撞击现象学基础研究来支持, 提高超高速撞击实验水平变成了一个不可回避的课题。2009 年的第五届全国空间碎片安全研讨会提供的信息资料表明, 与先进国家相比, 在我国的航天科学数据库里, 超高速撞击实验数据几乎还是一片空白。在国外, 20 世纪 60 年代就普遍建立起了 8~10 km/s 的超高速撞击实验技术, 而我国至今尚未具备进行弹速超过 7 km/s 的撞击实验能力, 因此, 研制高水平的超高速撞击实验装备仍然是摆在我国航天器安全研究面前的一个紧迫课题。

2005 年, 西北核技术研究所启动了三级压缩气炮研制工作, 目标是改进拓展氮气驱动的多级压缩气炮发射技术, 使之能够成为弹速达到 8 km/s 的撞击实验服务平台, 本文中, 对 57-37-10 三级压缩气炮的设计与实验情况进行具体讨论。

* 收稿日期: 2011-06-10; 修回日期: 2011-12-01

作者简介: 林俊德(1938—), 男, 研究员, 博士生导师, 院士。

1 物理设计

三级压缩气炮技术是在二级压缩气炮技术的基础上进行开发的,研制目的是扩展二级压缩气炮的上限弹速,实现弹速达 8 km/s 的超高速撞击。

三级压缩气炮主要用于研究超高速撞击和空间防护结构实验,了解不同材料、不同形状的弹丸在不同速度下撞击不同材料与结构靶板时产生的物理效应和力学破坏问题。气炮的规模和造价基本上与弹径呈 3 次幂关系,即弹径增大 1 倍,气炮的重量和造价需要增大 7 倍左右。空间碎片撞击航天器的速度很高,毫米级碎片就具有很大的杀伤力。为了减小气炮的建造成本和运行成本,空间碎片的撞击实验通常都采用小弹径气炮,上限弹速超过 8 km/s 的气炮发射管口径基本上都在 5.6~12.7 mm 之间,三级压缩气炮弹丸直径也按此选取。

图 1 是三级压缩气炮的结构简图。为节省经费和充分利用已有的 57-10 二级压缩气炮^[2],三级压缩气炮的发射管口径选为 10 mm,一级气室、一级泵管以及一级活塞与现在运行中的 57-10 二级压缩气炮共用,需要新设计的就剩下二级气室、二级泵管、二级活塞、三级气室和发射管。

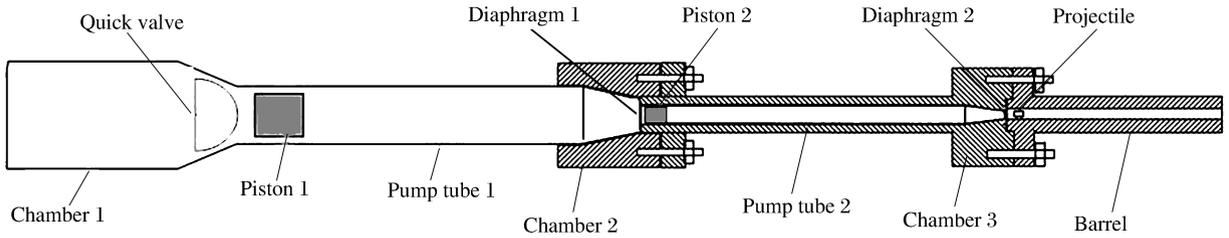


图 1 三级压缩气炮的原理结构图

Fig. 1 The structure of three-stage compressed-gas gun

三级压缩气炮由 2 座二级压缩气炮串联组成,1~2 级是一门特殊设计的二级压缩气炮。与通常的二级气炮设计要求不同,第 2 级的优化设计目标不是获得最大弹速(二级活塞速度),而是为 2~3 级组成的二级气炮输送尽可能大的弹丸发射能,改变 57-10 二级气炮能量传递效率不高的缺点。使在既定的 57-10 气炮 0.01 m³ 一级气室容积氮气驱动气压下,三级气炮能发射出比二级气炮更高速度的弹丸。

计算表明,发射弹速超过 8 km/s 弹丸的三级气室气压峰值需要超过 1 GPa,减小二级泵管的直径不但可以提高 2~3 级的能量传递效率,还可以减小三级气室的强度设计负担,有利于减小气炮发射实验中的冲击震动和噪声干扰。但是,在采用压缩氮气驱动一级活塞的条件下,随着二级泵管直径的减小,1~2 级的传送能量的效率也下降,不利于提高发射弹速,因此二级泵管口径、长度的优选必须考虑到多种因素之间的平衡。

表 1 是在原有 57 mm 一级泵管口径和 10 mm 发射管口径条件下,采用 37 mm 和 25 mm 两种二级泵管口径计算的发射效果。表中 d 为二级泵管口径, M 为二级活塞质量, p_1 为驱动气压, p_2 为二级泵管初压, u_2 为二级活塞速度, x 为二级活塞入锥量, p_3 为三级气室峰压, p 为弹底峰压, u 为弹丸速度。计算中弹丸速度采用 57-10 二级气炮研制运行中建立起来的经验程序,由 1~2 级计算出二级活塞速度,再以二级活塞速度作为 2~3 级二级气炮的驱动能源计算出弹丸速度。

影响三级气炮计算结果的可变参数很多,计算中只采用经过对比分析之后认为具有良好工程可行性的一组计算条件:一级泵管长 12 m,二级泵管长 7.4 m,发射管长 4 m,气室锥角 20°,压缩氮气驱动一级活塞,一级泵管初充 0.4 MPa 氢气,二级泵管初充 0.2~0.4 MPa 氢气,一级破膜气压 10 MPa,二级破膜气压 50 MPa,一级活塞质量 1 kg,二级活塞质量 250 g,弹丸质量 0.5 g。

图 2 是根据表 1 中数据绘制的 57-25-10 三级气炮和 57-37-10 三级气炮弹底气压峰值随弹速的变化曲线。可以看到,在同一弹速下,57-37-10 三级气炮弹底气压峰值低于 57-25-10 三级气炮,而降低弹底气压峰值是提高弹速上限的一个重要措施,采用 37 mm 二级泵管口径显然更有利于提高三级气炮弹速上限。这与弹速超过 8 km/s 的二级气炮泵管口径皆为发射管口径的 4~8 倍^[3]的情况也基本一致,

因此采用了 37 mm 口径二级泵管的三级压缩气炮方案。

图 3 是 57-37-10 三级气炮中 1~2 级和 2~3 级发射参数变化过程的典型计算结果(计算参数同表 1, 二级泵管初压 0.3 MPa, $t=0$ 为破膜发射的起始时刻)。

图 3 表明,在弹速约 8 km/s 的发射中,计算的三级气室的气压峰值约 1.4 GPa,对应的气温峰值达到 3 000 °C,弹底气压峰值约 90 MPa,相应的二级活塞速度峰值约 700 m/s,二级气室与活塞底端的气压峰值约 32 MPa。

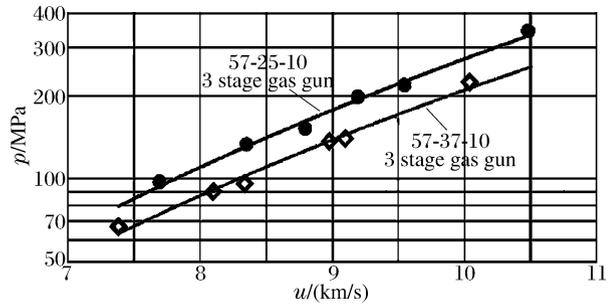


图 2 弹底气压随弹速的变化

Fig. 2 The change of pressure behind projectile due to rising velocity of projectile

表 1 57-25-10 三级气炮和 57-37-10 三级气炮的发射效果差异

Table 1 The difference between launching projects on 57-25-10 three-stage gas gun and 57-37-10 three-stage gas gun

d/mm	M/g	p_1/MPa	p_2/MPa	$u_2/(\text{m/s})$	x/mm	p_3/MPa	p/MPa	$u/(\text{m/s})$
37	250	15	0.25	713	38	2.0	137	8 977
			0.30	705	35	1.4	90	8 098
			0.35	698	31	1.0	67	7 383
		18	0.25	783	39	3.6	225	10 037
			0.30	775	38	2.5	140	9 097
			0.35	768	36	1.8	96	8 337
25	100	15	0.25	696	40	2.0	198	9 196
			0.30	689	41	1.4	133	8 353
			0.35	682	42	1.0	97	7 697
		18	0.25	763	37	4.2	344	10 482
			0.30	756	39	2.8	219	9 549
			0.35	750	41	2.0	152	8 798

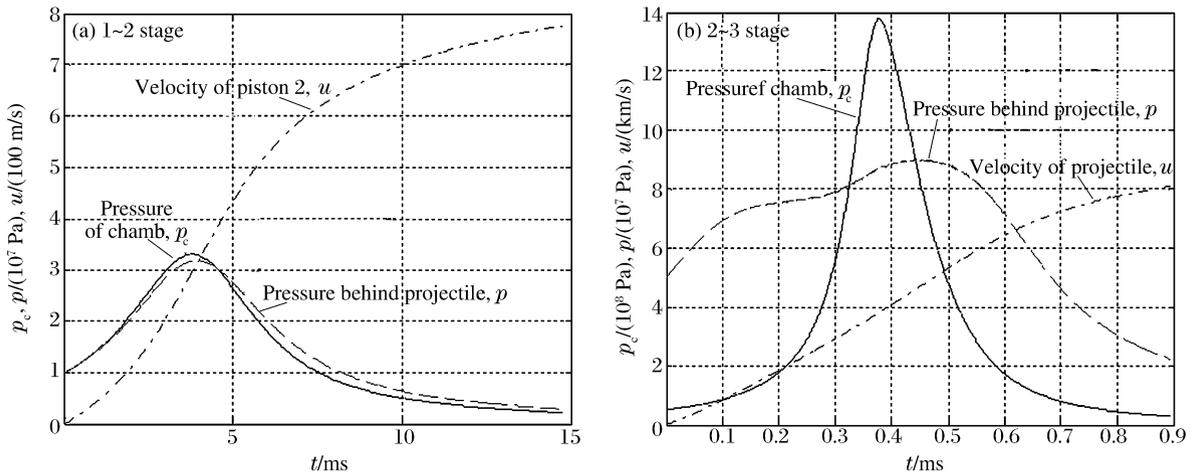


图 3 57-37-10 三级气炮的发射参数变化过程

Fig. 3 The changing course of parameters on 57-37-10 three-stage gas gun

2 结构设计

57-37-10 三级气炮的第 1 级采用西北核技术研究所 1984 年研制的 57 mm 口径单级轻气炮^[4],该

气炮气室容积 0.01 m^3 ,最大驱动气压 30 MPa ,发射管长 12 m ,氮气驱动的最大弹速 800 m/s ,氢气驱动的最大弹速 $1\,400 \text{ m/s}$ 。

与大部分高速轻气炮的破膜发射方式不同,57 气炮采用西北核技术研究所研制的高速锥阀发射^[5],操作更方便。图 4 是 57-37-10 三级气炮的一级气室与发射装置外观。

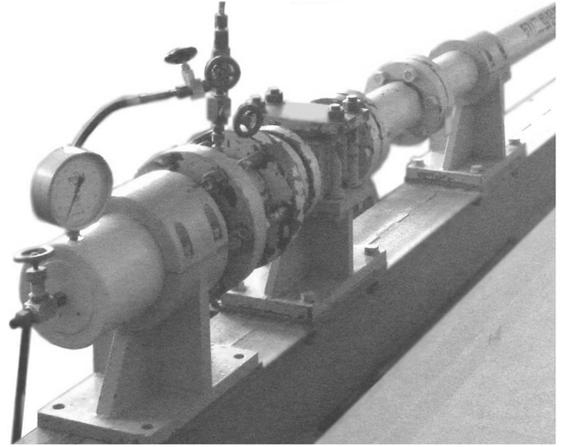
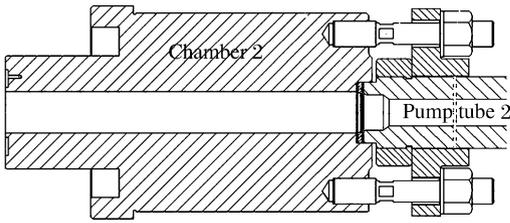


图 4 57 气炮的气室与发射装置

Fig. 4 The pressure chamber and the launching equipment of 57 gas gun

57-37-10 三级气炮的二级气室沿用西北核技术研究所 2002 年研制的 57-10 二级气炮的二级气室结构形式,由于三级气炮的二级气室气压不到 50 MPa ,比 57-10 二级气炮低 $5\sim 10$ 倍,级间的口径比值也小很多,没有必要采用锥面过渡,因而采用圆柱气室形式,外部结构尺寸完全沿袭 57-10 气炮设计。图 5 是 57-37-10 三级气炮的二级气室工程图与外观照片。

(a) Structure



(b) Picture

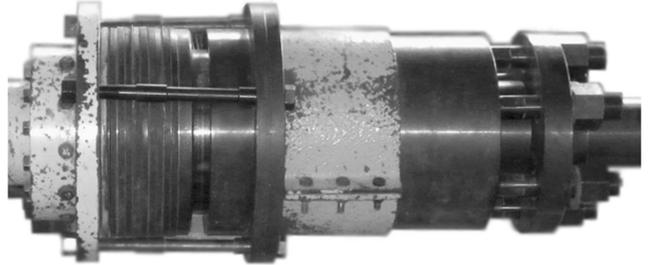
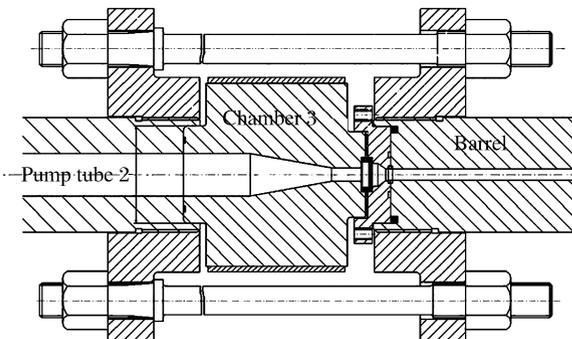


图 5 57-37-10 三级气炮的二级气室

Fig. 5 The pressure chamber 2 of 57-37-10 gas gun

图 6 是 57-37-10 三级气炮的三级气室结构图与外观照片。根据表 1 计算数据,当弹速超过 8 km/s 时,三级气室的气压峰值超过 1 GPa ,气室的强度按照 3 GPa 气压抗力设计。出于发射实验后清理活塞和膜片的需要,三级气室成为一个便于装卸的直径和长度都为 160 mm 的圆柱体。图 7 是 57-37-10 三级气炮的工作场景。

(a) Structure



(b) Picture

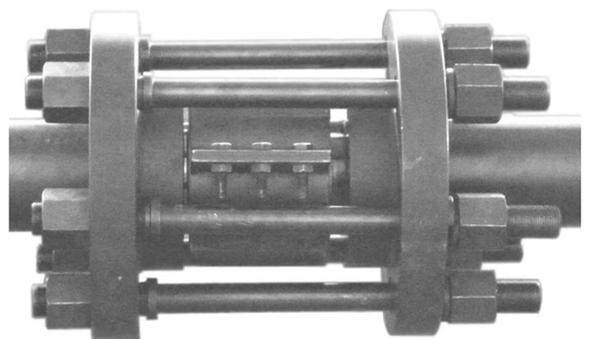


图 6 57-37-10 三级气炮的三级气室

Fig. 6 The pressure chamber 3 of 57-37-10 gas gun

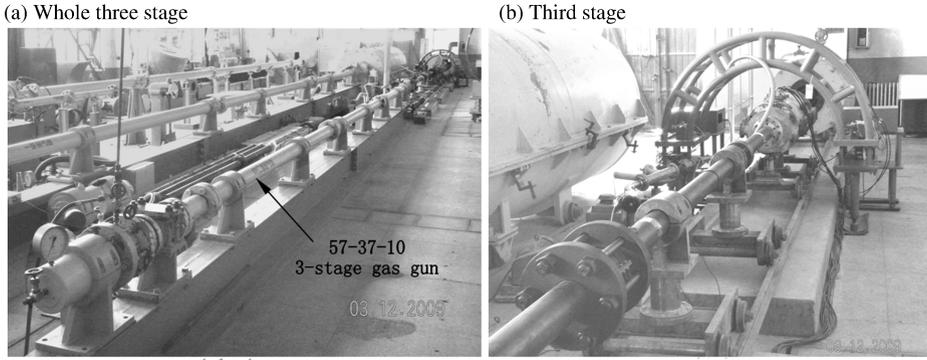


图 7 57-37-10 三级压缩气炮

Fig. 7 The 57-37-10 compressed-gas gun

3 调试实验

压缩氮气驱动的 57-37-10 三级气炮是 57-10 二级压缩气炮技术的延伸,目的是通过减小级间口径比改善多级压缩气炮能量传递效率,从而提高氮气驱动压缩气炮的弹速上限。因此,57-37-10 三级压缩气炮调试实验的首要任务是通过实验评估 57-37-10 三级压缩气炮的弹速开发潜力,考察其设计思想的正确性。

10~12 MPa 氮气驱动实验结果已经表明,57-37-10 三级气炮的设计思路方向是正确的。如表 2 数

表 2 57-37-10 三级气炮与 57-10 二级气炮的实验弹速对比

Table 2 The velocities of projects launching on 57-37-10 three-stage gas gun and on 57-10 two-stage gas gun

气炮	p_N /MPa	p_p /MPa	m /g	u_c /(m/s)	T /K
57-10 二级炮 (2.5 m 发射管)	10.0	0.100	0.74	4 970	2 500
	10.0	0.100	0.98	5 070	2 510
	15.0	0.100	1.02	5 950	3 230
	15.0	0.120	0.69	6 320	2 810
	15.0	0.085	0.73	7 310	3 670
	18.0	0.100	0.69	7 010	3 620
	18.0	0.100	0.70	7 080	3 620
	21.4	0.085	0.73	7 310	4 600
	21.4	0.085	0.78	7 350	4 600
	28.0	0.085	0.73	7 420	5 400
57-10 二级炮 (4 m 发射管)	12.1	0.085	0.67	6 030	2 828
	14.8	0.085	0.67	6 450	3 213
	14.8	0.085	0.48	6 720	3 227
	15.0	0.085	0.47	7 130	3 250
57-37-10 三级炮 (4 m 发射管)	10.0	0.200	0.46	6 000	1 860
	10.0	0.200	0.46	5 900	1 860
	12.0	0.200	0.41	6 520	2 260
	15.0	0.300	0.41	7 025	3 330
	15.0	0.300	0.41	7 350	3 330
	15.0	0.300	0.41	7 560	3 330
	16.0	0.320	0.42	7 690	3 057
	18.0	0.320	0.42	7 990	3 767
	19.8	0.320	0.42	8 090	4 079
16.0	0.350	0.41	7 730	3 100	

据所示,与同一驱动气压的 57-10 二级气炮相比,57-37-10 的弹速显著提高了,高压气室的计算气温峰值明显下降了。弹速的增大说明级间的能量传递效率得到改善,高压气室气温峰值的下降说明发射管与弹丸的烧蚀风险在减小,而发射管与弹丸的烧蚀是提高弹速的最终障碍。因此,57-37-10 三级气炮具备比 57-10 二级气炮发射更高弹速的潜力。表中 p_N 为氮气驱动气压, p_p 为二级泵管氢气初压, m 为弹丸质量, u_e 为实测弹速, T 为计算气室气温。

调试实验的第 2 个任务是优化发射参数组合,使得能够以最小的发射成本(多级气炮的高弹速发射成本主要来自发射管烧蚀)进行高弹速实验。三级气炮的发射参数构成比二级气炮复杂,包括驱动气压、一级活塞质量、一级泵管初压,一级膜片破裂气压、二级活塞质量、二级泵管初压、二级膜片破裂气压和弹丸质量 8 个变量,同一弹速发射可以由不同的发射参数组合来完成,但是效率和成本各不相同,需要在实践中进行科学优化。

调试实验的第 3 个任务是对一级活塞、二级活塞、一级膜片、二级膜片和弹丸进行三级优化,以提高 57-37-10 三级气炮的发射弹速上限。实践表明,二级活塞和弹丸的优化设计最重要,表 2 中 57-10 二级气炮(4 m 发射管)与 57-37-10 三级气炮的 3 个 15.0 MPa 发射实验弹速存在明显差异就是因为使用了 3 个不同活塞设计造成的。

图 8 是表 2 中弹速为 7 730 m/s 发射实验后的活塞、膜片与靶板外观照片。一级活塞变形不大,金属圆柱体可以重复使用,二级活塞在发射中出现严重塑性变形,厚 25 mm 的钢质靶板被 0.41 g 弹丸迎面撞击出一个直径 25 mm 的弹坑,背面出现直径 40 mm 的材料层裂性破坏凸起。

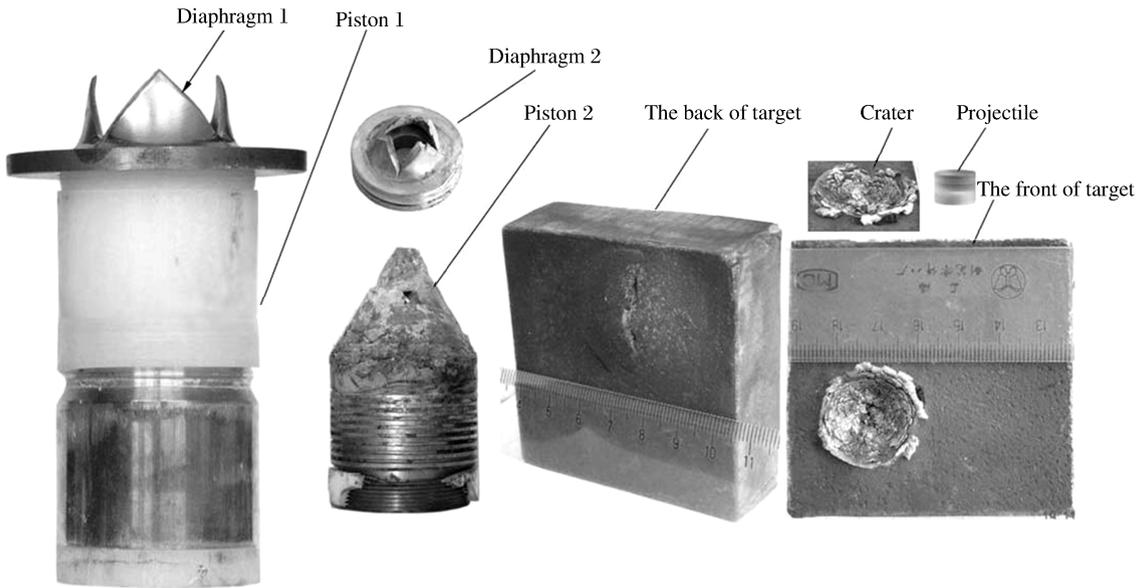


图 8 发射实验后的活塞、膜片与弹坑

Fig. 8 The pistons and diaphragms after launching and the crater produced by impact of projectile

参考文献:

- [1] 黄本诚,马有礼. 航天器空间环境试验技术[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [2] 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):229-239.
LIN Jun-de. A analysis of launching parameters for a two-stage light gas gun not driving by powder[J]. Explosion and Shock Waves, 1995,15(3):229-239.
- [3] 王金贵. 气体炮原理及技术[M]. 北京:国防工业出版社,2001:65-70.
- [4] 杨伯全,曹述生,林俊德. 口径 57 mm 单级压缩氢气炮[J]. 爆炸与冲击,1985,5(4):54-59.
YANG Bo-quan, CAO Shu-sheng, LIN Jun-de. A single-stage light gas gun of 57 mm caliber[J]. Explosion and

Shock Waves, 1985,5(4):54-59.

[5] 林俊德. 弹速 1 400 m/s 的 57 mm 气炮阀门[J]. 爆炸与冲击, 1985,5(3):61-66.

LIN Jun-de. A valve for a 57 mm caliber gas gun launching projects to velocity of 1 400 m/s[J]. Explosion and Shock Waves, 1985,5(3):61-66.

The technique of three-stage compressed-gas gun for hypervelocity impact *

LIN Jun-de, ZHANG Xiang-rong, ZHU Yu-rong, LIU Wen-xiang
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

Abstract: The background of developing three-stage gas gun technique driven by compressed-nitrogen for launching 8 km/s projectiles was presented. The effects of substituting a two-stage compressed-gas gun with a three-stage compressed-gas gun on elevating projectiles velocity were briefly described. The relationship between the driving pressure, the initial pressure of pump tube and the load of the pressure chamber were discussed for the 57-37-10 three-stage gas gun. Some progress on developing the 57-37-10 three-stage gas gun was shown.

Key words: mechanics of explosion; high speed impact; launching technique; three-stage compressed-gas gun

* Received 10 June 2011; Revised 1 December 2011

Corresponding author: LIN Jun-de, wxliu_nint@yahoo.com.cn

(责任编辑 曾月蓉)

《爆炸与冲击》第八届编辑委员会会议纪要

2012年7月27日,《爆炸与冲击》第八届编辑委员会会议在青海省西宁市西宁宾馆召开,出席会议的有编委、编辑共27名。会议由常务副主编赵剑衡教授主持,第七届主编孙承纬院士介绍了第八届编辑委员会成员。

大家一起回顾了创刊以来的历史和发展,怀念老一代编委、审稿人、编辑,肯定了近年来的刊物工作,尤其是本刊在《中文核心期刊要目总览》力学类名列第二,得到了爆炸力学界的认可。编辑部作了工作汇报,包括近年来刊物工作取得的成绩,一年来稿件状况的分析,改进和优化的建议和措施。编委就如何吸引国内外优秀稿源、提升刊物学术水准,充分发挥编委优势、进一步发展刊物的方向和措施,提高编辑质量的建议等进行了热烈的讨论。

主编刘仓理教授讲话,强调:坚持办刊宗旨、拓展热点方向,提供发表学术成果的平台;加强审稿提高效率,提升学术质量,缩短发表周期;编委应主动撰写高质量论文和综述性文章;编辑部尽量参加本学科各项活动,获取信息并宣传刊物;加强摘要尤其英文摘要的规范撰写;严格保守国家秘密等。

(供稿 丁峰,张凌云,王易难)

2012年8月13日