**文章编号**：1000-5773(2008)01-0108-05

# 提高平衡炮发射能力的初步研究*

段吉员，王彦平，刘仓理，于 川

（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实验室，四川绵阳 621900）

**摘要**：针对平衡炮试验中所要求的发射指标超过其发射能力的具体情况，提出了两种提高平衡炮发射能力的途径，并作了相应的内弹道性能分析，目的在于提高平衡炮的使用效率，充分发挥其作为大质量试验件的有效加载工具的效能，该研究可为提高平衡炮及其它火炮的发射能力提供依据和参考。

**关键词**：平衡炮；发射指标；发射能力；内弹道

**中图分类号**：O315；TJ012.1 **文献标识码**：A

## 1 引 言

平衡炮是一种特殊结构形式的滑膛无后座炮，其特点是利用平衡体在炮管内反向运动，以抵消火炮发射时的后座力，在炮膛轴线方向上，作用力基本平衡，炮架承载很小，因而炮口径可以做到很大，是研究大尺寸、大质量试验件的有效试验加载工具，解决了缩比试验所带来的局限性，对于侵彻动力学研究、侵彻体设计技术、材料动态响应、引战配合技术以及数值模拟技术等方面的研究具有十分重要的意义。平衡炮结构如图 1 所示。

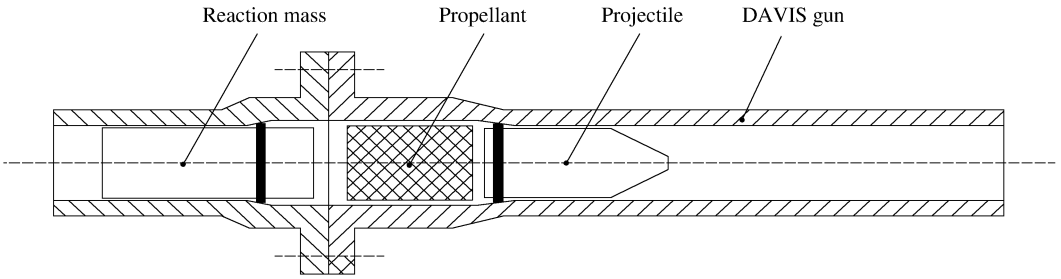



图 1 平衡炮结构示意图

Fig. 1 Schematic of DAVIS gun

平衡炮的发射能力是根据其设计指标，通过内弹道[1]、身管载荷及强度计算而确定的，其表征参数主要有弹丸质量 $m$、弹丸初速 $v$、最大膛压 $p_m$ 及装药量 $\omega$。弹丸初速一般分为高速（$v>600$ m/s）、中速（$v=300\sim600$ m/s）和低速（$v<300$ m/s）三类。目前，平衡炮试验所用的发射药为三胍-15 不同弧厚 $\delta$ 的多孔圆柱形或花边形火药，装药为单一模式，即每次试验前根据弹丸质量和初速要求，利用已知的发射药参数，通过内弹道计算，确定其中的一种作为发射药。对于小质量弹丸以中、高初速发射的情况，发射药选取燃速较快的中等弧厚（$\delta=20\sim30$ mm）或薄弧厚（$\delta<20$ mm）火药，以保证膛压不能太低、弹丸能顺利出膛；对于大质量弹丸以中、低初速发射的情况，发射药选取中等弧厚或厚弧厚（$\delta>30$ mm）火药，以保证发射药燃烧平稳，膛压不能过高，确保炮的发射安全。但在试验中，往往遇到小质量弹丸以

* **收稿日期**：2006-10-10；**修回日期**：2007-03-12

**作者简介**：段吉员（1976－），男，硕士，助理研究员，主要从事爆轰基础研究. E-mail：duanjiyuan2005@tom.com

低初速发射和大质量弹丸以高初速发射的情况,这两种情况均超过了平衡炮设计规定的发射能力。本研究针对这两种情况,根据各自特点,在确保试验安全的前提下,提出了提高炮的发射能力的解决途径,以满足试验要求。

## 2　小质量弹丸低初速发射

### 2.1　问题分析

当小质量弹丸以低初速发射时,由于装药量 $\omega$ 很少,因而装填密度 $\Delta=\omega/V_0$ 很低,$V_0$ 为炮的初始药室容积,发射药燃烧产生的膛压也就低,不能保证弹丸顺利出膛,有可能发生卡膛和发射药燃烧不完全的情况。

例如,试验要求用 203 mm 口径的平衡炮以 200 m/s 的初速发射质量为 20 kg 的弹丸,而该炮的设计规定的发射能力范围为:弹丸质量 50～200 kg,初速 300～700 m/s,试验要求的发射指标超出了该范围,在炮的初始药室容积下,通过编程计算[2-4]内弹道诸元,得到的计算结果列于表 1。

**表 1　在初始药室容积下计算的内弹道诸元**

**Table 1　The calculated interior ballistic parameters in terms of $V_0$**

| $m$/(kg) | Propellant type | $\omega$/(kg) | $V_0$/(m$^3$) | $\Delta$ /(g/cm$^3$) | $v$/(m/s) | $p_m$/(MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | Three guanidine-15 12/19 | 0.9 | 0.033 | 0.027 | 200 | 8.3 |

分析表 1 中数据:装填密度为 0.027 g/cm$^3$,在以往的平衡炮试验中,装填密度在 0.03～0.74 g/cm$^3$ 范围之内时,平衡炮运行良好,而表 1 中的装填密度小于该指标,因此发射药燃烧所产生的膛压低,发射药有可能燃烧不充分,在以往的试验中曾出现过这一现象,给弹道性能带来很大影响,而且最大膛压与平衡炮上的弹丸启动压力 $p_0$ 接近,$p_m=8.3$ MPa,$p_0$ 一般在 8 MPa 左右,弹丸有可能不能顺利出膛,造成试验危险,所以必须采取相应措施。

### 2.2　解决途径

由装填密度 $\Delta$ 的计算公式可知,要提高 $\Delta$,可从提高 $\omega$ 和减小 $V_0$ 两方面考虑,为了满足既定的弹丸发射初速指标,在 $V_0$ 保持不变的情况下,提高 $\omega$ 是不能达到要求的,因而只能从降低 $V_0$ 出发。根据这个思路,设计了一个试验辅助装置——药筒衬套(呈圆筒形,其长度和外径与炮药室的长度及内径相匹配,其内径与试验所选用的发射药筒外径相匹配),试验时放置在炮药室内,发射装药放于药筒衬套内,药室容积从初始的 $V_0$ 减小到当前的 $V_1$。本研究针对用 203 mm 平衡炮以 200 m/s 的初速发射质量为 20 kg 的弹丸这一具体的试验要求,设计了一个药筒衬套,使药室容积从最初的 0.033 m$^3$ 降低到当前的 0.019 m$^3$。

在当前的药室容积下,计算的内弹道诸元见表 2。在两种药室容积下,膛压、弹速内弹道计算曲线分别如图 2 和图 3 所示。

**表 2　在当前药室容积下计算的内弹道诸元**

**Table 2　The calculated interior ballistic parameters in terms of $V_1$**

| $m$/(kg) | Propellant type | $\omega$/(kg) | $V_1$/(m$^3$) | $\Delta$ /(g/cm$^3$) | $v$/(m/s) | $p_m$/(MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | Three guanidine-15 12/19 | 0.60 | 0.019 | 0.032 | 200 | 14.5 |

比较分析在两种药室容积下的内弹道计算结果发现,在满足 20 kg 弹丸以 200 m/s 初速发射的条件下,药室容积从 0.033 m$^3$ 降到 0.019 m$^3$,发射药类型不变,$\omega$ 从 0.9 kg 降低到 0.6 kg,而 $\Delta$ 从 0.027 g/cm$^3$ 提高到 0.032 g/cm$^3$,达到了平衡炮试验所要求的正常范围(0.03～0.74 g/cm$^3$)之内,$p_m$ 从 8.3 MPa 提高到 14.5 MPa,超过了弹丸启动压力,在满足试验要求的发射指标的情况下,试验的安全性也得到了大大提高。

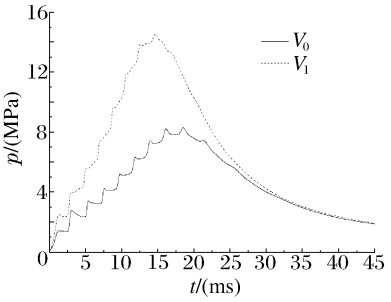



图 2 在两种药室容积下膛压内弹道计算曲线

Fig. 2 The calculated interior ballistic $p$-$t$ curves in terms of $V_0$ and $V1$

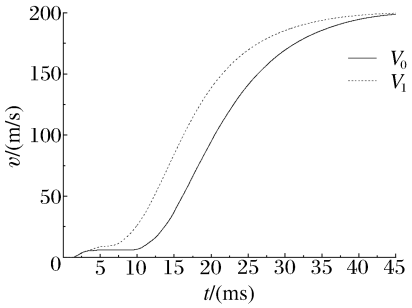



图 3 在两种药室容积下弹速内弹道计算

Fig. 3 The calculated interior ballistic $v$-$t$ curves in terms of $V_0$ and $V_1$

## 3 大质量弹丸高初速发射

### 3.1 问题分析

针对大质量弹丸以高初速发射的情况，单一装药模式如选用燃烧比较平缓的厚弧厚火药作为发射药，产生的膛压较低，即使在全装药条件下，膛压在炮身管允许的压力范围内仍有很大的上升空间，膛压作用时间虽长，但对弹丸总的作功能力并不强，而且由于装药量很大，装填密度相应也很大，传火通道不够畅通，发射药燃烧不充分，利用率低，影响内弹道计算精度，炮口压力大，产生的烟雾大，还对试验测试造成不便；如选用燃速较快的中等弧厚或薄弧厚火药作为发射药，产生的膛压虽然高，即使膛压达到身管允许压力范围的上限，但由于其作用时间短，对弹丸总的作功能力并未得到加强，而且装药量相对低，药室空间还有不少富裕量。所以单一装药模式不能有效地解决膛压和膛压作用时间之间的关系，使平衡炮的发射能力受到很大限制。

为了提高平衡炮的发射能力，应该改变当前试验中的单一装药模式，而选用混合装药模式[5]。

### 3.2 解决途径

混合装药能有效地解决膛压和膛压作用时间之间的关系，使二者之间达到最优化匹配。在选用厚弧厚火药作为主发射药的基础上，添加适量的中等弧厚或薄弧厚火药，称为辅助发射药。在满足发射指标的条件下，混合装药由于兼有厚弧厚火药燃烧平稳和薄弧厚火药燃速快的特点，产生的膛压高，作用时间长，对弹丸作功能力加强，发射能力可得到显著提高。

例如，对 320 mm 口径平衡炮，试验要求以 700 m/s 的初速发射质量为 420 kg 的弹丸，而在单一装药模式下，对 420 kg 的弹丸，在全装药条件下，最大发射初速为 680 m/s，内弹道诸元计算结果列于表 3，结果表明，单一装药模式不能满足试验要求。通过采用混合装药(装药参数见表 4)，在装药量有所降低的情况下，初速可提高到 700 m/s，内弹道诸元计算结果列于表 5，而且初速还可进一步提高到 750 m/s，试验仍是安全的。在两种装药模式下，弹速和膛压计算曲线分别如图 4 和图 5 所示。

**表 3 单一装药模式下计算的内弹道诸元**

**Table 3 The calculated interior ballistic parameters in terms of solo propellant**

| $m$/(kg) | Propellant type | $\omega$/(kg) | $\delta$/(mm) | $\Delta$ /(g/cm$^3$) | $v$/(m/s) | $p_m$/(MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 420 | Three guanidine-15 12/19 | 74 | 3.6 | 0.74 | 680 | 310.4 |

**表 4 混合装药参数**

**Table 4 The parameters of multiple propellants**

| Primary propellant | | | Assistant propellant | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Type | $\omega_1$/kg | $\delta_1$/(mm) | Type | $\omega_2$/kg | $\delta_2$/(mm) |
| Three guanidine-15 36/7 | 43 | 3.6 | Three guanidine-15 24/19 | 22 | 2.4 |

表 5　混合装药模式下计算的内弹道诸元

Table 5　The calculated interior ballistic parameters in terms of multiple propellants

| $m$/(kg) | $\omega$/(kg) | $\Delta$ /(g/cm$^3$) | $v$/(m/s) | $p_m$/(MPa) |
|---|---|---|---|---|
| 420 | 65 | 0.65 | 700 | 340 |

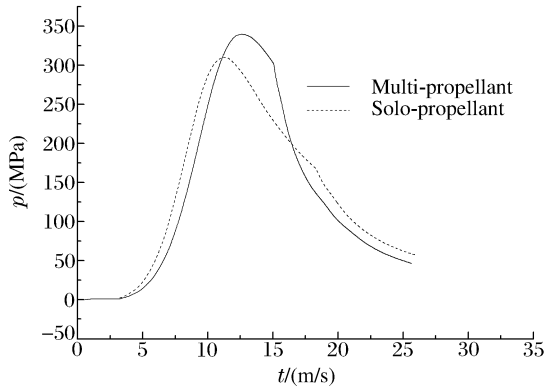



图 4　在两种装药模式下膛压内弹道计算曲线

Fig. 4　The calculated interior ballistic $p$-$t$ curves in terms of solo propellant and multiple propellants

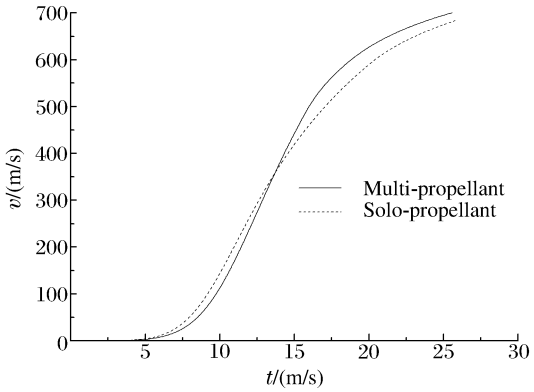



图 5　在两种装药模式下弹速内弹道计算曲线

Fig. 5　The calculated interior ballistic $v$-$t$ curves in terms of solo propellant and multiple propellants

比较分析在两种装药模式下的内弹道计算结果,发现从单一模式到混合模式,$\omega$ 从 74 kg 降低到 65 kg,而 $p_m$ 从 310.4 MPa 增加到 340 MPa,$v$ 从 680 m/s 增加到 700 m/s,在降低 $\omega$ 的同时,提高了 $v$,以满足试验要求。混合装药模式与单一装药模式相比,发射药利用更充分,优化了膛压和膛压作用时间之间的关系,加强了对弹丸的作功能力,大大提高了炮的发射能力。

## 4　结　论

对于试验所要求的小质量弹丸以超过平衡炮设计规定的发射能力下限发射的情况,即小质量弹丸低初速发射情况,为了确保试验顺利安全,通过设计药室衬套以减小药室容积,从而提高装填密度和膛压,以保证弹丸顺利出膛。通过内弹道计算,证明是确实可行的。

对于试验所要求的大质量弹丸以超过平衡炮设计规定的发射能力上限发射的情况,即大质量弹丸高初速发射情况,为了满足试验发射指标和确保试验安全,把以往的单一装药模式改为混合装药模式,通过内弹道计算表明,在装药量有所降低的情况下,弹丸初速还有所提高,可以满足试验要求,膛压虽然有所上升,但上升幅度不大,仍处于炮身管所允许的压力范围内,试验仍是安全的。

本文所述的两种提高发射能力的方式,可为拓宽此类平衡炮的发射能力范围提供依据,也可为提高其它火炮发射能力提供有益的参考。

## References:

[1]　Jing Z M, Yuan Y X, Song M. Nowaday Interior Ballistics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1992. (in Chinese)
金志明,袁压雄,宋　明. 现代内弹道学 [M]. 北京:北京理工大学出版社,1992.

[2]　Cai S Z. Calculational Methods [M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1993: 227-255. (in Chinese)
蔡锁章. 计算方法 [M]. 北京:中国科学技术出版社,1993:227-255.

[3]　Qian N. C$^{++}$ Programmer Course [M]. Beijing: Tsing Hua University Press, 1999. (in Chinese)
钱　能. C$^{++}$ 程序设计教程 [M]. 北京:清华大学出版社,1999.

[4]　Xu S L. C Common Calculational Programs [M] Beijing: Tsing Hua University Press, 1996: 167-182. (in Chinese)
徐士良. C 常用算法程序集 [M]. 北京:清华大学出版社,1996:167-182.

[5] Wang Z S, Xu F M, Zhang H X. The Design Principle of Propellant Form and Load [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1994. (in Chinese)
王泽山，徐复铭，张豪侠. 火药装药设计原理 [M]. 北京：兵器工业出版社，1994.

# The Preliminary Study of Improving DAVIS Gun Launching Capability

DUAN Ji-Yuan, WANG Yan-Ping, LIU Cang-Li, YU Chuan

(1. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physic, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621900, *China*)

**Abstract**: Aimed at idiographic conditions of launching target in excess of launching capability in DAVIS gun experiments, two ways of improving DAVIS gun launching capability for enhancing efficiency and exerting function of DAVIS gun, and the interior ballistic performance was assessed. The ballistic analysis can be regarded as the foundation and reference of improving DAVIS and other guns' launching capability.

**Key words**: DAVIS gun; launching target; launching capability; interior ballistics

## 《高压物理学报》征稿简则

《高压物理学报》是我国高压物理领域唯一的专业性学术刊物，在国内外公开发行。力求及时报道高压物理学科基础理论和应用研究方面具有创新性、高水平、有重要意义的研究成果，读者对象为国内外科技工作者。征稿内容为动态及静态高压技术，人工合成新材料，高温高压下材料的力学、光、电、磁等特性以及物质微观结构的研究，动态及静态高压研究中的测试技术，高温高压下的相变，高温高压物态方程等。接受中、英文稿件。

1. 来稿应具有科学性、先进性和实用性，论点明确、论据可靠、数据准确、逻辑严谨、文字简练、图表清晰。每篇论文的篇幅应在6 000～8 000字以内，请使用中华人民共和国法定计量单位。论文格式请参考近期出版的《高压物理学报》。请使用电子邮件投稿(gaoya@caep.ac.cn)，也可提供软盘。

2. 所投稿件不得涉及国家及本单位机密，投稿时请附本单位保密审查意见，由审查者签名并加盖公章。

3. 文章标题字数应在20字以内。文中图、表应有自明性，所有图题、图注、表题、表注均为中、英文对照，图、表中的文字一律用英文。

4. 第一作者应确保全体作者同意文章署名，请提供第一作者、通讯作者简介(姓名、出生年、性别、职称、学位、研究方向等)，以及所有联系方式(通信地址、邮政编码、电话号码、传真、电子邮箱等)，以备联系。请注明论文(工作)的资助项目(资助项目名称和批准号)，简要介绍工作背景和论文意义。

5. 来稿应保证文章版权的独立性，严禁抄袭，文责自负，请勿一稿多投。

**重点注意事项**

**▲ 中英文摘要** 摘要用第三人称书写，语言要简练，应有具体内容。要求：(1) 拥有与论文同等量的主要信息，重点包括4个要素：即研究目的、方法、结果和结论。(2) 以提供论文梗概为目的，不得评论、解释论文内容。中文摘要应在200～400个字之间，英文摘要不少于120个实词。为便于Ei Compendex以及国外其它数据库收录，英文摘要中尽量避免特殊字符(各种数学符号、上下脚标及希腊字母)及由特殊字符组成的数学表达式；第一句不要与英文题名重复；尽量用短句子并避免句形单调；用过去时态叙述主要工作，用现在时态叙述结论，尽量用主动语态代替被动语态。

**▲ 参考文献** 参考文献应是公开出版物。请充分著录参考文献，引用条数不宜太少，并尽量引用近期国内外文献，采用"顺序编码制"著录。中文参考文献必须附英译文，著录项目应齐全。

**▲ 版权与稿酬** 《高压物理学报》已加入《中国学术期刊(光盘版)》、万方数据——数字化期刊群 、中国核心期刊(遴选)数据库、中文科技期刊数据库、中国期刊网、台湾中文电子期刊服务——思博网(CEPS)等，并被Ei Compendex光盘收录。凡经本刊录用的稿件，其著作权(包括光盘版和网络版出版权)便自动转让给《高压物理学报》编辑部，编辑部不再另行通知。来稿一经发表，即付稿酬(包括光盘版和网络版稿酬)。

《高压物理学报》一贯秉承服务科学、服务读者、服务作者的办刊理念，慎重对待每一篇来稿，尊重作者劳动。优秀稿件享有快速发表通道，重大创新性成果可在3个月内刊出。

通信地址：四川绵阳919信箱110分箱《高压物理学报》编辑部，邮政编码：621900

电子邮件：gaoya@caep.ac.cn (投稿、征订、咨询)

电　　话：(0816)2490042；传真：(0816)2282695

《高压物理学报》编辑部