

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.11.004

## 冲压增程炮弹发展研究

郑健, 周长省, 陈雄

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 针对未来战争中炮兵武器向远程化精确打击的目标发展, 阐述冲压增程技术在炮弹中的应用前景。从冲压增程炮弹的结构组成和工作原理出发, 阐明冲压增程炮弹的增程效率高, 是炮弹增程技术的主要发展方向。介绍国外主要发达国家及国内冲压增程炮弹研究发展的技术状况, 并针对国内外的研究状况, 概括了冲压增程炮弹研制中需解决的关键技术问题。同时, 结合目前炮兵武器发展的特点, 提出未来冲压增程炮弹远程化、制导化和精确化的发展方向。

**关键词:** 冲压发动机; 增程; 炮弹; 远程化

**中图分类号:** TJ412 **文献标志码:** A

## Study and Development of Ramjet Extended-Range Projectile

Zheng Jian, Zhou Changsheng, Chen Xiong

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science &amp; Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Aiming at artillery weapons to the long-range precision strike in future wars, the application prospect of ramjet extended-range technology in the projectile was described. From the structure composition and working principle of the ramjet extended-range projectile, its high efficiency was demonstrated, and it was the main development direction of ramjet extended-range technology. At the same time the study and development technology of ramjet extended-range projectile in the main developed countries abroad and domestic were introduced. And according to the study situation at home and abroad, the key technical problems to be solved in the process of the ramjet extended-range projectile development were summarized. Finally, combined with artillery weapons development characteristics at present, development orientation to remote, guidance and precision of the ramjet extended-range projectile in the future was proposed.

**Keywords:** ramjet; extended-range; projectile; remote

### 0 引言

未来战争前后方界限将越来越不明显。打击纵深, 袭击其后方目标, 可提高己方部队的作战灵活性和生存能力, 保护自身实力, 并赢得战争主动权。弹药是远程精确打击武器系统对敌目标实施毁伤打击的重要组成部分, 直接影响到武器系统的作战效能。对于中大口径弹药, 提高炮弹射程就能在非接触性作战中实施远距离和超远距离打击<sup>[1]</sup>。

提高炮弹射程的主要方法有弹形减阻、底部排气减阻、助推火箭发动机、冲压发动机、滑翔增程以及各种方法组合使用的复合增程等。其中, 弹形减阻的增程率为 15%~25%, 底排或火箭发动机的增程率为 20%~40%, 底排/火箭复合增程的增程率为 40%~50%、滑翔增程的增程率为 60%~70%、冲压发动机的增程率为 >70%<sup>[2-3]</sup>。

可见, 冲压增程炮弹是未来陆军低成本、远程压制弹药的主要发展方向之一。目前, 固体冲压发动机在战术导弹上的应用技术取得了较大的进展,

已有产品装备部队。但固体冲压发动机在炮弹上的应用还处于研究阶段, 许多关键技术还有待突破, 而美国、瑞典、俄罗斯及南非等国在该技术领域研究处于世界领先地位。因此, 笔者对其进行研究。

### 1 冲压增程炮弹结构组成及工作原理

#### 1.1 冲压增程炮弹结构组成

从 1913 年法国人雷内·劳伦 (Rene Lorin) 提出冲压发动机原理以来, 冲压发动机就开始作为动力装置广泛应用于飞行器中<sup>[4-5]</sup>。针对冲压增程炮弹, 笔者提出了 2 种结构设计方案: 一是 1933 年的苏联 Кисенкон 方案 (见图 1); 二是 1975 年的美国 Squier 方案 (见图 2)<sup>[6]</sup>。

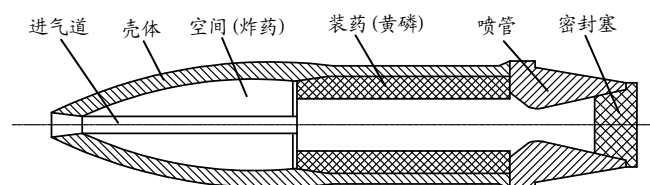


图 1 冲压增程炮弹 Кисенкон 方案结构图

收稿日期: 2011-08-09; 修回日期: 2011-08-22

基金项目: 十一五装备预先研究项目“增程火箭冲压发动机技术”(104050102)

作者简介: 郑健(1978—), 男, 浙江人, 博士, 讲师, 从事固体火箭发动机总体技术研究。

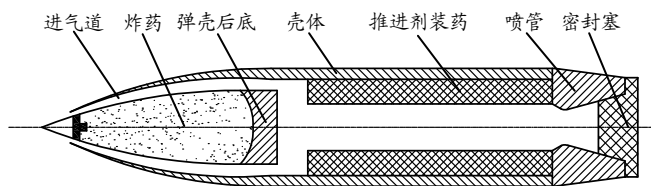


图 2 冲压增程炮弹 Squier 方案结构图

1933 年, 苏联把 Кисенкон 方案应用在 76 mm 冲压增程炮弹上, 并进行了炮射试验, 取得了明显的效果, 射程增加了 50%, 比冲量达到 423 s。如图 1, 其外形与普通炮弹相似, 只是在前端有进气口, 中有进气道, 燃烧室内装有黄磷作为燃料, 后面有喷管。而 1975 年, 美国 Squier 的方案除了将上进气道改为环形通道、定心部前移之外, 与 1933 年的苏联 Кисенкон 方案没有重大区别。

综上所述, 无论是 1933 年的苏联 Кисенкон 方案, 还是 1975 年的美国 Squier 方案, 冲压增程炮弹基本上由进气道、炸药、壳体、推进剂装药、喷管和密封塞等组成。

## 1.2 冲压增程炮弹工作原理

冲压增程炮弹的工作原理是: 当弹丸从火炮膛内发射出去之后, 获得很高的初速。在弹丸高速飞行中, 空气由弹丸头部的进气口进入弹丸内膛的进气道, 然后进入燃烧室。空气中的氧与燃料充分作用, 产生的高温高压燃气流经喷管加速, 以很高的速度喷出, 产生很高的后喷动量, 以使弹丸获得很大的增速量。由于利用了空气中的氧气参与燃烧, 提高了燃料比能量, 因而增程效率大幅度提高。冲压发动机理论比冲达到 9 000~12 000 N·s/kg, 是普通火箭发动机的 4~6 倍。

## 2 冲压增程炮弹的发展现状

针对固体冲压发动机在炮弹上的应用, 美国、瑞典、荷兰、南非、以色列、韩国等国做了大量的研究和工程应用工作。

美国将固体燃料冲压发动机 (solid fuel ramjet, SFRJ) 技术应用于炮弹的研究始于 1979 年。冲压增程炮弹按照稳定方式的不同可分为: 旋转稳定弹 (弹长为 267.7 mm) 和尾翼稳定弹 (弹长大于 267.7 mm)。1984 年, 陆军弹道实验室起初研究了 75 mm 固体燃料冲压发动机旋转稳定弹 (如图 3), 固体燃料为 HTPB, 以口径为 105 mm 的 M68 坦克炮为发射装置, 进行了自由飞行试验, 固体燃料冲压发动机在 1.6 s 内产生的推力约为 1 100 N。后来, 又研制

出尾翼稳定的远程反坦克弹, 即“先进间接发射系统” (advanced indirect fire system, AIFS)<sup>[7]</sup>, 弹径为 203 mm, 弹长为 2 548 mm, 弹重约为 114 kg, 如图 4。针对不同的推进剂配方和内部结构, 以 M110A-2 加农炮为发射装置, 进行自由飞行试验, 其射程超过 60 km。目前, 美国正在研发的还有 155 mm 和 127 mm 固体冲压增程炮弹, 其射程分别可达 70 km 和 80 km。

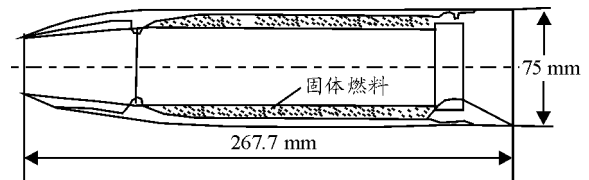


图 3 75 mm SFRJ 旋转稳定弹

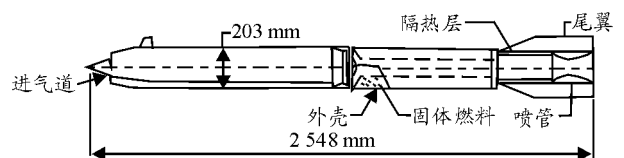


图 4 203 mm SFRJ 尾翼稳定弹

20 世纪 80 年代末, 瑞典国防研究院开始研究一种旋转稳定、固体燃料冲压发动机为动力的防空炮弹, 弹径为 40 mm, 马赫数 4.3, 燃烧时间约为 2~3 s, 弹长约为 200 mm, 利用准真空弹道模型 (即推力等于阻力), 提出了固体燃料冲压发动机增程炮弹的简易设计方案, 如图 5。1995 年, 瑞典国防研究院和荷兰应用科学研究院 (TNO) 开始合作研究 155 mm 固体燃料火箭冲压发动机增程榴弹 (见图 6), 突破了空气动力学、燃烧室、喷管性能、炮弹性能预估、机械设计和火炮系统等关键技术, 于 2001 年初成功进行了飞行试验, 飞行距离 3 000 m, 发动机工作时间大于 4 s, 炮弹最大飞行马赫数达到 4 马赫。



图 5 瑞典 40 mm SFRJ 增程炮弹



图 6 瑞典和荷兰合作的 155 mm SFRJ 增程榴弹

1989 年, 荷兰开始研究炮射 SFRJ 助推反坦克

弹,即“动能穿甲弹”,直径分别为 75 mm 和 90 mm,并进行了自由飞行试验,其马赫数为 4,在海平面上射程为 2 500 m。2000—2004 年,TNO 与瑞典 RWMS AG 公司合作研究中口径旋转稳定的固体燃料冲压发动机增程炮弹,于 2004 年 5 月在瑞士 Ochsenboden 试验场进行了飞行试验,发射装置为 KDA 火炮,射程为 1 000 m。在炮弹飞行的前 50 m 中,11 发被成功点火,证明了在马赫数为 4 的情况下,固体燃料冲压发动机具有维持炮弹飞行速度为出膛速度(约 1 400 m/s)的能力,这在欧洲乃至整个世界尚属首次。

1993 年,南非开始研究将 SFRJ 应用于动能穿甲弹上,在马赫数为 4 的条件下成功完成了数值模拟、风洞试验、燃烧试验、动力学试验和飞行试验,采用燃料为 HTPB。1998 年开始研制旋转稳定的 155 mm SFRJ 炮弹(见图 7),并于 2001 年完成了实弹发射试验,发射装置为 45CAL 火炮,仰角约 22°~30°,出膛初速约 900 m/s,一共发射了 6 发炮弹,其中 3 发炮弹点火成功,证实了燃料药柱的成功点火,射程约为 55 km。



图 7 南非 155 mm 固体燃料冲压发动机增程炮弹

1998 年,印度提出了 155 mm SFRJ 增程炮弹的设计方案,如图 8。该方案发射初速大于 2 个马赫数,发射时进气口前端保护膜破裂,空气流入进气道,点燃主装药,发动机工作结束后马赫数可达 4,增程效果显著。但目前仍有部分关键技术未能得到很好突破,如细长弹体飞行稳定性、点火可靠性等。

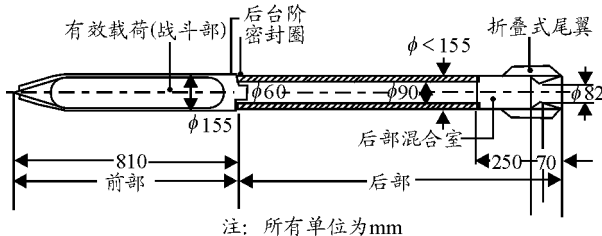


图 8 印度 155 mm SFRJ 增程炮弹示意图

1999—2002 年,韩国对固体燃料冲压发动机旋转稳定炮弹进行了研究,设计了单锥和皮托型 2 种进气道,并进行了风洞和自由飞行试验。炮弹直径为 40 mm,弹长 200 mm,由 L/70 40 mm 海军火炮

系统发射,初始马赫数 3.0。结果表明:单锥进气道的总压恢复系数比皮托型进气道高,但受攻角的影响较大。使用皮托型进气道的炮弹表现出自点火和稳定燃烧,但其推进性能太低,难以达到增速增程目的。

2006 年,以色列成功完成了以 SFRJ 为二级动力装置的增程炮弹飞行实验,射角为 55°,炮弹全重 91.5 kg,弹长 3.7 m,第一级推进器为火箭发动机,外径 160 mm,重量 64.8 kg;第二级推进器为固体燃料冲压发动机,外径 120 mm,重量 26.7 kg,如图 9。炮弹发射后,固体火箭发动机工作 8~10 s,将炮弹加速到马赫数 2.7,高度约 3 km;然后,固体火箭发动机与炮弹分离,固体燃料冲压发动机开始工作,增程炮弹速度维持在飞行马赫数。



图 10 以色列 SFRJ 增程炮弹

国内从 20 世纪 90 年代末开始,航天科工三院 31 所与南京理工大学合作开展固体燃料冲压发动机炮弹增程研究,2006 年开展弹用固体燃料冲压发动机性能预示研究,2007 年开始对固体燃料冲压增程炮弹进行了结构原理样弹设计,结构强度分析<sup>[8-10]</sup>。

2007 年以来,南京理工大学进行了 155 mm 冲压增程炮弹的原理样机设计、风洞试验、地面工作转级试验、强度飞行试验等工作,取得了实质性进展<sup>[11-13]</sup>。

总之,就国外冲压增程弹药的研究发展现状来看,研制的中大口径弹药采用冲压增程技术以后其射程大都可以达到 70 km 以上,增程率达 100%。而我国目前在冲压增程炮弹研制方面尚处于原理样弹的试验论证及演示阶段,离产品定型及装备部队还有一段距离。

### 3 冲压增程炮弹关键技术分析

冲压增程炮弹具有结构简单、成本低、增程效率高和战斗威力降低少等特点<sup>[14]</sup>,但其冲压发动机设计及工作过程都非常复杂,涉及到气体动力学、

传热学、燃烧学、结构力学、控制理论、优化理论等领域, 因此在冲压增程炮弹研制过程中尚需突破以下关键技术:

1) 炮弹气动外形—进气道—冲压发动机一体化设计技术。根据冲压增程炮弹的飞行弹道需要, 提出冲压增程炮弹的总体技术指标, 完成弹体的结构布局设计; 通过气动外形与进气道一体化设计, 进气道—燃烧室—喷管的匹配设计, 得到满足进气量和降低阻力的气动布局及外形; 进行弹道仿真, 提出发动机具体性能指标<sup>[15]</sup>。

2) 高能贫氧推进剂技术。目前, 国外先进的固体火箭冲压发动机都采用高能含硼贫氧推进剂。由于硼粒子的点火和燃烧过程非常复杂, 要将硼的热量全部发挥作用非常困难。对于国内含硼在 30% 左右的推进剂, 目前其燃气发生器内喷射效率约为 80%, 在发动机补燃室中的燃烧效率仅为 60% 左右, 因此, 深入研究硼粒子的喷射特性及补燃特性, 采用硼粉预处理, 寻求提高燃烧效率的途径, 是冲压增程炮弹研制过程中所要解决的关键技术之一。

### 3) 高性能进气道设计

固体冲压发动机在炮弹上的应用必然要考虑到前弹体对发动机进气道的影响, 因此, 进气道的设计要考虑炮弹的总体布局、发射限制等种种约束。因此, 结合炮弹的飞行空域/速度需要, 设计满足要求的高性能进气道将是冲压增程炮弹实现增程必须突破的关键技术之一。

### 4) 发动机补充燃烧技术研究

推进剂的高效燃烧是保证速度和射程的必要条件, 固体冲压发动机补燃室内的燃烧特性对提高发动机比冲至关重要。补充燃烧室设计既要考虑到巡航飞行段的经济性, 又要考虑到加速段的大推力稳定工作。空气与贫氧燃气的配合既要考虑提供足够的空气维持燃料燃烧, 又要保证燃烧区的温度足够高以满足固体粒子的高效燃烧反应<sup>[16]</sup>。

5) 冲压发动机转级技术。固体冲压发动机在助推段工作时, 为保护进气道前缘、降低飞行阻力、避免进气道内气流振荡对发动机结构的破坏, 进气道入口处于封闭状态。同时, 采用整体式助推器的发动机, 为避免助推时燃烧室内的高温燃气反窜至进气道内导致结构损坏, 进气道出口要处于封闭状态。因此, 在固体冲压发动机助推段到冲压续航段的过渡时刻, 进气道入口、出口要按照顺序迅速、可靠地打开。冲压发动机转级机构的设计是保证冲

压增程炮弹正常工作的重要条件。

## 4 结束语

冲压增程炮弹的增程率大于 70% 以上, 在未来炮射弹药发展中具有巨大的优势和潜力, 是国内外新一代超高速动能弹、远程弹药的主要发展方向。但为了适应未来战争的局部性和复杂性, 冲压增程炮弹应具有远程精确打击的能力, 在其研制过程中应朝着远程化、制导化、精确化的发展方向努力。

## 参考文献:

- [1] 吴护林. 炮弹增程技术的发展[J]. 四川兵工学报, 2005, 26(5): 3-6.
- [2] 吴杰, 陈继祥, 陈邓安, 等. 舰炮制导炮弹的关键技术研究[J]. 兵工自动化, 2011, 30(3): 8-10.
- [3] 曾国强. 舰炮制导炮弹发展趋势研究[J]. 机械管理开发, 2009, 24(6): 44-48.
- [4] Ronalds Fry. A Century of Ramjet Propulsion Technology Evolution[J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(1): 27-58.
- [5] 张玲翔. 美国弹用冲压发动机技术的进展[J]. 飞航导弹, 1998, 28(6): 38-43.
- [6] 单益义. 冲压炮弹的发展及前景[J]. 现代兵器, 1987, 10(3): 1-5.
- [7] 杨小平. 先进的间接瞄准系统(AIFS)—远程末端制导炮弹[J]. 现代兵器, 1984, 7(3): 34-36.
- [8] Chen Xiong, Zhou Changsheng, Zheng Ya. Influence of Cowl Leading Edge on Inlet Performance of Ramjet Assisted-Range Projectiles[R]. America: AIAA, 2005: 2005-3642.
- [9] Chen Xiong, Zheng Ya, Zhou Changsheng. Numerical Simulation on Ramjet Inlet with different Cowl Leading Edge[R]. America: AIAA, 2005: 2005-5288.
- [10] Chen Xiong, Zheng Jian, Liang Hua. Experimental and Numerical Research on Inlet of Ramjet Assisted-range Projectile[R]. America: AIAA, 2007: 2007-5010.
- [11] 王筱蓉, 姜根柱, 周长省. 冲压增程炮弹流场数值仿真分析[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(4): 400-403.
- [12] 夏强, 武晓松, 孙波. 固体燃料冲压增程炮弹用混合式进气道数值模拟及实验研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(10): 1372-1378.
- [13] 孙俊, 武晓松, 夏强, 等. 固体燃料冲压增程炮弹力学分析[J]. 弹道学报, 2010, 22(1): 49-53.
- [14] 安斌丰, 李彬, 言克斌. 固体燃料冲压增程炮弹发展现状及关键技术[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(3): 110-112.
- [15] 向敏, 张为华. 冲压增程炮弹发动机性能分析[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(4): 185-188.
- [16] 张磊, 周长省, 鞠玉涛. 冲压增程炮弹发动机补燃室内流场分析[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(20): 5480-5484.