

# 气推式脱壳穿甲弹脱壳机理研究

冯苏苇<sup>1</sup> 臧国才<sup>2</sup>

(戴世强推荐, 1995年10月30日收到)

## 摘 要

气推式脱壳穿甲弹以其结构简单, 脱壳干扰小, 无自伤等优点而具有广阔的应用前景。本文对它的弹托气室与外界环境之间的充排气规律进行了研究。在此基础上, 建立了气推弹脱壳运动的动力学模型, 给出了脱壳过程中弹托与弹芯的起动条件和分离判据。计算了某航炮用气推弹脱壳运动情况, 指出了气孔面积对气室储压、脱壳时间及脱壳距离的影响。

**关键词** 气推式脱壳穿甲弹 充气 排气 脱壳运动

## 一、引 言

气推式脱壳穿甲弹(简称气推弹)是一种利用空气动力学原理脱壳的主动式脱壳弹, 其结构简单(见图1), 由弹托和弹芯构成。弹托为空心圆柱体, 内部开气室, 底部有气孔与外界连通。发射时, 火药燃烧产生高温高压气体, 一方面推动弹丸做加速运动, 另一方面通过气孔对气室充气, 使之储存高压气体。随着火药的燃尽, 膛内压力的减小, 在一定情况下, 气室会向炮膛排气。气推弹离开膛口后, 火药气体冲出膛外, 气压迅速降低。此时, 气室内储存的高压气体继续向外界排气, 同时推动弹芯与弹托分离。

气推弹具有膛口脱壳干扰小、无自伤等优点, 因而有较广泛的应用前景。本文详细研究了气推弹气室充排气规律以及膛外脱壳运动机理, 建立了相应的数学模型, 并计算了一个实例, 所得的结果为实验测量提供布靶依据。

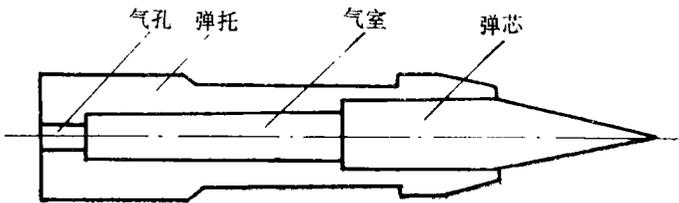


图1 气推式脱壳穿甲弹结构

1 上海大学, 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072

2 南京理工大学弹道研究所, 南京 210094

## 二、气室充排气规律

在本文的研究中, 假设火药气体为理想气体, 不计化学变化情况下是完全气体, 由于运作时间极短, 认为物理过程是绝热的; 并且忽略火药气体流入流出气室对膛压的影响。

弹托气室内气体物理参数的变化受到外界环境的影响。在弹丸发射阶段, 膛内压力很高, 火药气体通过气孔向气室充气, 气室内的压力、密度和温度随着气体流入而增加。在一定条件下, 可能出现气室内气体向膛内排气的情况, 气室内气体压力随气体排出而减小。在膛外脱壳阶段, 由于气室内气压总高于膛口流场气体压力, 因此气室总处于排气状态。定义  $m(t)$  为流经气孔的气体质量秒流量,  $m(t) > 0$  表示外界对气室充气,  $m(t) < 0$  为气室向外界排气, 则气室气体连续方程可描述为

$$\frac{d\rho V}{dt} = m(t) \quad (2.1)$$

式中  $\rho$  为气体密度,  $V$  为气室容积。

由绝热方程  $P = c\rho^k$ , 得到

$$d\rho = \frac{m(t)}{V} dt - \frac{\rho}{V} dV, \quad dP = \kappa \frac{P}{\rho} d\rho \quad (2.2)$$

又根据状态方程  $P = \rho RT$ , 可有方程组

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \rho_1 + \frac{m(t)}{V} (t_2 - t_1) - \frac{\rho}{V} (V_2 - V_1) \\ P_2 &= P_1 + \kappa \frac{P}{\rho} \frac{m(t)}{V} (t_2 - t_1), \quad T_2 = \frac{1}{\kappa} \frac{P_2}{\rho_2} \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

下面确定气孔内的质量秒流量  $m(t)$ 。气孔内的流动可视为一维管流<sup>[1]</sup>, 在气室的充气阶段有

$$\left. \begin{aligned} \frac{\rho}{\rho_0} &= \left(1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{\kappa-1}}, \quad \frac{P}{P_0} = \left(1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \\ \frac{T}{T_0} &= 1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

式中  $\lambda$  为气流速度与临界音速之比, 称为速度系数。  $P, \rho, T$  为气室参数,  $P_0, \rho_0, T_0$  为外界参数。

设气孔面积为  $A$ , 流速为  $u$ , 则质量秒流量为

$$m(t) = \rho u A \quad (2.5)$$

由(2.4), (2.5)两式, 可导出

$$m(t) = \varphi_1 \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1}} \frac{P_0 A}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\left(\frac{P}{P_0}\right)^{2/\kappa} - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{(\kappa+1)/\kappa}} \quad (2.6)$$

其中  $\varphi_1$  为考虑气孔内粘性附面层而引入的修正系数。

气孔内气流速度和秒流量不会无限制地增大, 当气室压力与外界压力之比  $\bar{P}$  达到一维管流临界压力比  $\bar{P}_*$  时, 即

$$\bar{P} = P/P_0 \quad (2.7)$$

$$\bar{P}_* = \frac{P_*}{P_0} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (2.8)$$

气孔气体以音速流动, 此时流量达到最大值

$$\dot{m}(t) = \dot{m}_* = \varphi_1 \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1}} \frac{P_0 A}{\sqrt{RT_0}} \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \quad (2.9)$$

当气室压力与外界压力之比继续小于临界压力比时, 即当  $\bar{P} < \bar{P}_*$  时, 气孔内的气流速度不会再增加, 仍维持音速, 秒流量也保持最大值  $\dot{m}_*$ . 而当  $\bar{P} > \bar{P}_*$  时,  $\dot{m}(t)$  按 (2.6) 式计算.

随着火药的燃尽, 膛内火药气体在达到最大值后开始衰减. 由于气室参数变化稍滞后于膛内环境变化, 气室仍处于充气阶段, 其内压力继续增加. 这样就会在某一时刻出现气室压力等于膛压, 继而超过膛压, 于是气室向膛内排气. 气室的排气阶段, 气体流动满足类似上述的规律. 只是由于气流方向改变, 外界变成出流的反压环境. 定义  $\bar{P}'$  为外界压力与气室压力之比,  $\bar{P}'_*$  为对应的临界压力比, 即

$$\bar{P}' = P_0/P \quad (2.10)$$

$$\bar{P}'_* = \frac{P_{0*}}{P} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (2.11)$$

当  $\bar{P}' > \bar{P}'_*$  时,

$$\dot{m}(t) = -\varphi_1 \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1}} \frac{PA}{\sqrt{RT}} \sqrt{\left(\frac{P_0}{P}\right)^{2/\kappa} - \left(\frac{P_0}{P}\right)^{(\kappa+1)/\kappa}} \quad (2.12)$$

而当  $\bar{P}' \leq \bar{P}'_*$  时,

$$\dot{m}(t) = -\varphi_1 \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1}} \frac{PA}{\sqrt{RT}} \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \quad (2.13)$$

其中  $P$ ,  $T$  为气室参数,  $P_0$ ,  $T_0$  为外界参数.

这样气室与外界之间的充排气规律以及相应的充排气状态的转换条件就确定了.

### 三、脱壳运动

炮膛内弹丸的发射阶段, 火药气体推动弹丸做加速运动. 膛内弹丸运动规律及火药气体参数变化规律可由内弹道基本方程组给出<sup>[2]</sup>.

气推弹离膛后, 被弹丸封闭的火药气体冲出膛外, 在膛口附近迅速膨胀, 形成含复杂波系的气流场. 膛口流场的生成发展是一个在短时间内完成的复杂的非正常过程, 它对飞行其中的弹丸的作用也很复杂. 文献[4]对膛口流场进行了合理的工程简化.

在气推弹离膛的初期, 弹托与弹芯相连作整体运动. 此时由于弹底受到膛口火药气体的推力  $F$ , 弹丸速度有所增加, 增速  $\Delta V$  可按下式计算

$$\Delta V = \frac{1}{m} \int_{t_0}^{t_1} (F + D_1 + D_2) dt \quad (3.1)$$

式中  $D_1$  和  $D_2$  分别为弹托和弹芯所受的气动力<sup>[3]</sup>.

设  $F_1$  和  $F_2$  分别为气室内气体对弹托和弹芯的作用力,  $G$  和  $f$  为弹托和弹芯之间的相互接触力和摩擦力,  $m_1$ ,  $m_2$  分别为弹托和弹芯的质量,  $a_1$ ,  $a_2$  分别为两者的加速度, 则弹托和弹芯的运动方程可以描述为

$$m_1 a_1 = F + F_1 + D_1 + G \quad (3.2)$$

$$m_2 a_2 = F_2 + D_2 - G \quad (3.3)$$

此时弹托与弹芯之间没有相对运动, 即尚未起动, 两体以等加速度运动, 它们之间的相互作

用表现为接触力,且摩擦力为零,则

$$G = [m_1(F_2 + D_2) - m_2(F + F_1 + D_1)] / (m_1 + m_2)$$

在两体起动的瞬间,接触力消失,即 $G=0$ ,因而起动的判别条件为

$$m_1(F_2 + D_2) - m_2(F + F_1 + D_1) = 0 \quad (3.4)$$

弹托与弹芯起动后,即进行分离运动,此时出现了两体间的摩擦力,且它们的运动方程可描述为

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{1}{m_1} (F + F_1 + D_1 + f), \quad \frac{dS_1}{dt} = V_1 \quad (3.5)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{1}{m_2} (F_2 + D_2 - f), \quad \frac{dS_2}{dt} = V_2 \quad (3.6)$$

式中 $V_1$ ,  $V_2$ 和 $S_1$ ,  $S_2$ 分别为弹托和弹芯的运动速度和绝对位移。

当弹托和弹芯运动的相对距离 $\Delta S$ 等于两体相嵌长度 $l_0$ 时,即

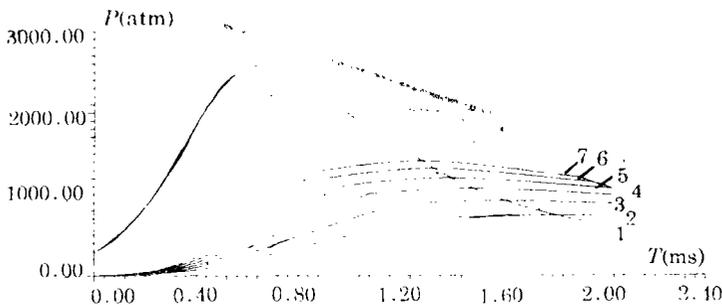
$$\Delta S = |S_2 - S_1| = l_0 \quad (3.7)$$

则认为该时刻弹托与弹芯分离。

#### 四、算例与结果分析

应用上述气室充排气规律以及弹芯弹托膛外分离运动原理,计算了某航炮用气推弹脱壳运动情况。

计算表明,气室气孔面积的大小直接影响着整个脱壳运动过程。图2给出了膛内运动阶段不同气孔面积对应的气室充排气情况。可以看出,气孔面积一定时,随着膛压曲线的变化,气室内有明显的充排气过程。膛压曲线与气室压力曲线的交点对应着由充气转入排气的时刻。每一条气室压力曲线上,当气孔内气流由非临界流动转入临界流动时,两者流动规律不同造成了压力曲线上的转折。



1-膛压曲线; 2-气孔面积 $0.315 \times 10^{-5} \text{m}^2$ ; 3-气孔面积 $0.415 \times 10^{-5} \text{m}^2$ ; 4-气孔面积 $0.515 \times 10^{-5} \text{m}^2$   
5-气孔面积 $0.615 \times 10^{-5} \text{m}^2$ ; 6-气孔面积 $0.715 \times 10^{-5} \text{m}^2$ ; 7-气孔面积 $0.815 \times 10^{-5} \text{m}^2$

图2 气孔面积对气室压力的影响

图2也表明,不同的气孔面积对应着不同的气室压力曲线。气孔面积较小,膛口气室压力不足,会在一定程度上影响膛外弹托的气动脱壳力;过大的气孔面积将导致排气段气室压力的迅速衰减,对膛外脱壳不利。

气室气孔面积对弹托和弹心起动时间 $t_{sta}$ 、分离时间 $t_{par}$ 、分离时弹芯速度 $V_r$ 和分离时弹芯距膛口的位置 $S_r$ 的影响由下表给出:

表1 气孔面积对脱壳运动的影响

$A(10^{-5}m^2)$	$t_{sta}(ms)$	$t_{par}(ms)$	$V_r(m/s)$	$S_r(m)$
0.415	0.13	1.14	874.78	0.990
0.515	0.12	1.13	874.55	0.981
0.615	0.13	1.24	872.46	1.075
0.715	0.14	1.36	870.39	1.178
0.815	0.15	1.50	868.35	1.297
0.915	0.16	1.71	866.01	1.476

从上表的计算结果可以看出:当气孔面积在 $0.515 \times 10^{-5}m^2$ 附近时,气推弹有最小的起动时间和分离时间,此时弹芯距膛口位置最近,且有较高的弹芯分离速度。该计算结果可为实验布靶提供依据。实验表明它与测值较为符合。

利用所编制的计算程序,可以对不同的气推弹腔室结构和发射条件做出优化预测。

### 参 考 文 献

- [1] M. J. 左克罗, J. D. 霍夫曼, 《气体动力学》, 国防工业出版社, 北京(1984).
- [2] 华东工学院103教研室, 《内弹道学》, 国防工业出版社, 北京(1978).
- [3] 臧国才, 李树常, 《弹箭空气动力学》, 兵器工业出版社, 北京(1989).
- [4] 冯苏苇, 气推式脱壳弹脱壳运动研究与计算, 南京理工大学硕士论文(1995).

## The Study of Sabot-Discarding Mechanism of Gas-Propelled APDS

Feng Suwei

(Shanghai Institute of Appl. Math. Mech., Shanghai University,  
Shanghai 200072, P. R. China)

Zang Guocai

(Ballistics Research Lab. of China. Nanjing University of  
Science & Technology, Nanjing 210094, P. R. China)

### Abstract

With the advantages of simpler structure, smaller disturbance and no self-hurt while discarding sabot, the gas-propelled amor-piercing projectile with discarding sabot(APDS) owns its promising prospect. This paper has studied the gas-filling and ejecting characteristics between the gas chamber in sabot and the environment. A dynamical model describing the sabot-discarding process has been estab-

lished. The authors have also given the starting condition and the parting criterion of the parting motion during the sabot-discarding. The motion of the gas-propelled APDS has been carefully calculated. Finally, the effect of the gashole area has been analyzed not only on the pressure in the gas chamber near the barrel exit, but also on the sabot-discarding time and distance away from the barrel.

**Key words** gas-propelled APDS, gas-filling, gas-ejecting, sabot-discarding motion