

doi: 10.7690/bgzd.2016.02.018

基于弹性力学的枪弹拔弹力的理论计算

钱俊松, 刘 彬, 韩银泉

(中国兵器工业第五八研究所弹药自动装药技术研究应用中心, 四川 绵阳 621000)

摘要: 拔弹力是枪弹的主要性能指标之一, 为了准确掌握枪弹拔弹力的数值, 在弹性力学基本假设的基础上进行枪弹拔弹力的理论计算。对枪弹弹头与弹壳的结合处建立 3 种模型, 根据拉梅(Lame)公式分别得到了 3 种模型的径向和环向应力, 并结合 3 种模型在界面处的边界条件以及广义胡克定律得到结合压力与过盈量的关系, 最后, 根据压力与摩擦力的关系得到了拔弹力。计算结果表明: 采用拔弹力公式计算得到的拔弹力与实验值比较, 误差为 8.9%, 小于工程允许误差 15%, 证明该公式能够较为准确地计算枪弹拔弹力。

关键词: 弹性力学; 拔弹力; 结合压力**中图分类号:** TJ411 **文献标志码:** A

Theoretical Calculation of Extracting Bullet Force Based on Elasticity

Qian Junsong, Liu Bin, Han Yinquan

(Research & Application Center for Ammunition Automatic Charging & Assembly,
No. 58 Research Institute of China Ordnance Industry, Mianyang 621000, China)

Abstract: The extracting bullet force is one of the main performance of bullet, for acquiring extracting bullet force data, on the basis of elasticity, three models are established at the junction of the warhead and cartridge. According to the Lamé's formula, the radial and circumferential stresses of the three models are obtained. Combined with the boundary conditions of the interface of the three models and the generalized Hooke's law, the relationship of the pre-stress and the magnitude of interference are established. The extracting bullet force is obtained by the relationship of the pre-stress and the frictional force at last. The experimental value shows that the error of the extracting bullet force calculated by the formula is 8.9%, less than the engineering allowable error 15%, which proves that the formula can accurately calculate the extracting bullet force.

Keywords: elasticity; extracting bullet force; pre-stress

0 引言

用标准的测力设备将弹头从弹壳中沿弹壳轴线方向拔出所需的力, 称为枪弹的拔弹力。其数值大小直接影响枪弹的内弹道性能^[1]。拔弹力过小, 枪弹发射时膛内的膛压较正常枪弹的膛压小, 导致发射药燃烧不完全, 进而弹头的初速降低; 因此, 在枪弹设计和装配过程中, 拔弹力是需要严格控制的性能指标之一。

拔弹力是对弹头和装有发射药的弹壳进行结弹和罩口而获得的。在枪弹结弹过程中, 弹头与弹壳间采用过盈配合来固定。结弹完成后, 弹头与弹壳间产生了结合压力, 结合压力的大小与弹头和弹壳的材料参数、几何尺寸以及过盈量有关。在拔弹时需要克服弹头与弹壳间由于结合压力而产生的摩擦力, 这是拔弹力的主要来源。

1 理论模型的建立

常规枪弹主要由弹头、弹壳和底火 3 个部分组

成, 见图 1。弹头由外层的弹头壳和铅芯(或者钢芯)组装而成, 见图 2, 弹壳由黄铜或者钢冲压而成。

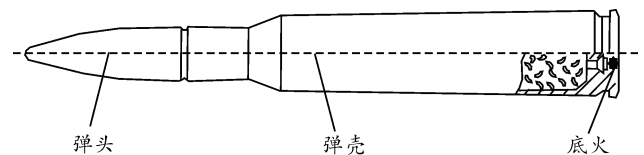


图 1 枪弹模型

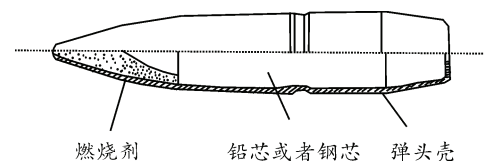


图 2 弹头模型

为了简化研究, 抓住关键的问题, 笔者采用假设^[2]如下:

- 1) 包容件(弹壳)与被包容件(弹头壳)处于平面应力状态, 即轴向应力 $\sigma_z = 0$;
- 2) 包容件(弹壳)与被包容件(弹头壳)在结合长度上, 结合压力为常数;

收稿日期: 2015-11-03; 修回日期: 2015-12-19

作者简介: 钱俊松(1989—), 男, 苗族, 重庆人, 硕士, 助理工程师, 从事非标机械设计研究。

3) 材料的弹性模量为常数。

弹头壳与弹壳间为过盈配合，弹头壳和弹壳的变形量之和等于装配过盈量；弹头壳与钢芯或铅芯之间为无滑移接触边界条件，即在弹头壳与钢芯或铅芯之间的交界面处应力与应变相等。弹头与弹壳结合处的截面如图 3。

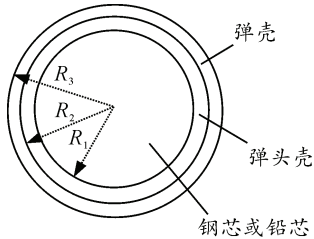
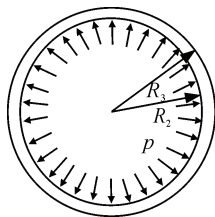
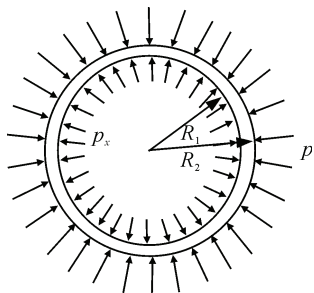


图 3 弹头与弹壳结合处的截面

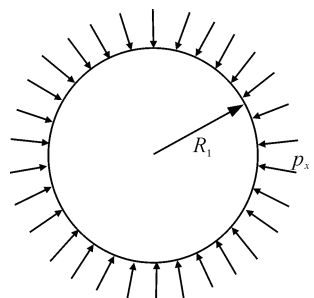
根据上述假设以及理论力学解约束的方法，将图 3 所示模型拆分为 3 个模型，并在结合处根据不同的接触条件施加边界条件，弹壳为仅受内压的圆筒，内压为 p ，见图 4(a)；弹头壳为既受内压又受外压的圆筒，外压为 p ，内压为 p_x ，见图 4(b)；钢芯或铅芯为受压圆柱，外压为 p_x ，见图 4(c)。



(a) 圆筒受内压的力学模型



(b) 圆筒受内外压的力学模型



(c) 圆柱受外压力学模型

图 4 3 种结构的力学模型

2 理论计算

上述 3 个模型均为弹性力学中圆筒受均布压力模型的解析解特例，该模型示意图如图 5。

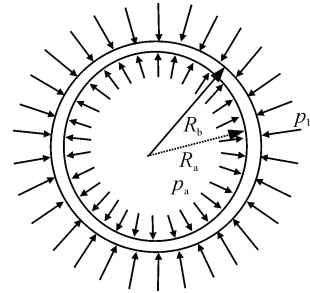


图 5 圆筒受均布压力模型

根据弹性力学圆筒受均布压力的拉梅 (Lame) 公式^[3]有：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\rho &= -\frac{R_b^2 - 1}{R_b^2 - 1} p_a - \frac{1 - \frac{R_a^2}{\rho^2}}{1 - \frac{R_a^2}{R_b^2}} p_b \\ \sigma_\phi &= -\frac{R_b^2 + 1}{R_b^2 - 1} p_a - \frac{1 + \frac{R_a^2}{\rho^2}}{1 - \frac{R_a^2}{R_b^2}} p_b \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中： ρ 、 ϕ 分别为极坐标系中的径向坐标分量和环向坐标分量； σ_ρ 、 σ_ϕ 分别为坐标点 (ρ, ϕ) 径向应力和环向应力； R_a 、 R_b 分别为圆筒的内径和外径； p_a 、 p_b 分别为圆筒受到的均布内压力和外压力。

图 4 中(a)、(b)、(c) 3 种模型的半径和边界条件分别为：

$$\left. \begin{aligned} R_a &= R_2, R_b = R_3 \\ p_a &= p, p_b = 0 \end{aligned} \right\}; \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} R_a &= R_1, R_b = R_2 \\ p_a &= p_x, p_b = p \end{aligned} \right\}; \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} R_a &= 0, R_b = R_1 \\ p_b &= p_x \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中： R_1 为弹头壳与钢芯或铅芯接触面处的半径； R_2 为弹头壳与弹壳接触面处的半径； R_3 为弹壳的外径； p 为弹头壳与弹壳接触面处的压力； p_x 为弹头壳与钢芯或铅芯接触面处的压力。

分别将式 (2)、式 (3) 和式 (4) 代入式 (1) 中可得到：

弹壳的径向应力和环向应力

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\rho &= -\frac{\frac{R_3^2}{\rho^2}-1}{\frac{R_3^2}{R_2^2}-1} p \\ \sigma_\varphi &= -\frac{\frac{R_3^2}{\rho^2}+1}{\frac{R_3^2}{R_2^2}-1} p \end{aligned} \right\}; \quad (5)$$

弹头壳的径向应力和环向应力

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\rho &= -\frac{\frac{R_2^2}{\rho^2}-1}{\frac{R_2^2}{R_1^2}-1} p_x - \frac{1-\frac{R_1^2}{\rho^2}}{1-\frac{R_1^2}{R_2^2}} p \\ \sigma_\varphi &= -\frac{\frac{R_2^2}{\rho^2}+1}{\frac{R_2^2}{R_1^2}-1} p_x - \frac{1+\frac{R_1^2}{\rho^2}}{1-\frac{R_1^2}{R_2^2}} p \end{aligned} \right\}; \quad (6)$$

钢芯或铅芯的径向应力和环向应力

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\rho &= -p_x \\ \sigma_\varphi &= -p_x \end{aligned} \right\}。 \quad (7)$$

将式 (5)、式 (6) 和式 (7) 得到的应力代入到物理方程 $\varepsilon_\rho = \frac{1}{E}(\sigma_\rho - \mu\sigma_\varphi)$ 中可得到:

$$\left. \begin{aligned} R_2 \left[-\frac{1}{E_3} (1 + \mu_3 \frac{R_3^2 + R_2^2}{R_3^2 - R_2^2}) p \right] + R_2 \left[-\frac{p}{E_2} - \frac{\mu_2}{E_2} \left(\frac{2R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} p_x - \frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} p \right) \right] &= \Delta \\ R_1 \left[-\frac{p_x}{E_2} - \frac{\mu_2}{E_2} \left(\frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} p_x - \frac{2R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} p \right) \right] &= \frac{\mu_1 - 1}{E_1} p_x R_1 \end{aligned} \right\}。 \quad (12)$$

其中 Δ 为弹头壳与弹壳之间的过盈量。

联立求解式 (12) 中的方程组可得

$$K = \frac{\mu_2(R_2^2 + R_1^2)}{E_2(R_2^2 - R_1^2)} R_2 + \frac{(\mu_3 - 1)R_3^2 + (\mu_3 + 1)R_2^2}{E_3(R_3^2 - R_2^2)} R_2 - \frac{R_2}{E_2} - \frac{2\mu_2 R_1^2 R_2}{E_2(R_2^2 - R_1^2)} \cdot \frac{2E_2 R_2^2}{[(\mu_2 - 1)E_2 + (\mu_2 + 1)E_1]R_2^2 + [(1 - \mu_1)E_2 - (1 - \mu_2))E_1]R_1^2}$$

K 是一个只与枪弹材料的弹性模量、泊松比以及几何参数相关的常数。

进一步地, 拔弹力

$$F = \int_0^L 2\pi R_2 p \mu dl = 2\pi R_2 L p \mu = 2\pi R_2 L \mu \frac{\Delta}{K}。 \quad (14)$$

其中: L 为弹头与弹壳的结合长度; dl 为弹头与弹壳结合长度方向上的一个微元; μ 为弹头与弹壳间的摩擦系数。

弹壳在 $\rho = R_2$ 处的径向应变

$$\varepsilon_{\rho|\rho=R_2} = \frac{1}{E_3} (\sigma_{\rho|\rho=R_2} - \mu_3 \sigma_{\varphi|\rho=R_2}) = -\frac{1}{E_3} (1 + \mu_3 \frac{R_3^2 + R_2^2}{R_3^2 - R_2^2}) p。 \quad (8)$$

弹头壳在 $\rho = R_2$ 和 $\rho = R_1$ 处的径向应变:

$$\varepsilon_{\rho|\rho=R_2} = \frac{1}{E_2} (\sigma_{\rho|\rho=R_2} - \mu_2 \sigma_{\varphi|\rho=R_2}) = -\frac{p}{E_2} - \frac{\mu_2}{E_2} \left(\frac{2R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} p_x - \frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} p \right); \quad (9)$$

$$\varepsilon_{\rho|\rho=R_1} = \frac{1}{E_2} (\sigma_{\rho|\rho=R_1} - \mu_2 \sigma_{\varphi|\rho=R_1}) = -\frac{p_x}{E_2} - \frac{\mu_2}{E_2} \left(\frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} p_x - \frac{2R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} p \right)。 \quad (10)$$

钢芯或铅芯在 $\rho = R_1$ 处的径向应变

$$\varepsilon_{\rho|\rho=R_1} = \frac{1}{E_3} (\sigma_{\rho|\rho=R_1} - \mu_1 \sigma_{\varphi|\rho=R_1}) = \frac{\mu_1 - 1}{E_1} p_x。 \quad (11)$$

因钢芯或铅芯与弹头壳接触处径向变形量相等, 弹头壳与弹壳接触处有径向变形量之和为过盈量。

$$P = \frac{\Delta}{K}。 \quad (13)$$

其中

3 实例验证

某型穿甲燃烧曳光弹由 H68 黄铜弹壳、H68 黄铜弹头壳以及钢芯构成, 结合长度 L 为 11.8 mm, 过盈量 Δ 为 0.005 mm, 半径 R_1 、 R_2 和 R_3 分别为 5.93、6.5 和 6.91 mm。2 种材料的弹性模量以及泊松比见表 1。黄铜与黄铜之间的静摩擦因素 μ 为 0.17^[4]。由实验测得其拔弹力 F 为 2 658 N。