

doi: 10.7690/bgzdh.2024.09.003

射击过程中火炮身管发热的简便计算及其影响分析

伍鹏宇¹, 侯峰², 侯栋²

(1. 海军装备部, 成都 610110; 2. 国营第 167 厂, 成都 610110)

摘要: 针对火炮身管设计中精确计算身管温度变化的问题, 提出一种身管吸收热量的简便算法。对身管射击中的能量转换作了简要分析, 以某科研产品身管数据进行验证, 分析身管发热的影响, 介绍身管烧蚀寿命以及烧蚀寿命终止标准, 冷却措施以及提高身管寿命措施。实验结果表明: 该算法切实可行, 可为身管设计提供参考。

关键词: 火炮身管; 身管发热; 简便计算; 影响分析

中图分类号: TJ303 **文献标志码:** A

Simple Calculation and Influence Analysis of Gun Barrel Heating in Firing Process

Wu Pengyu¹, Hou Feng², Hou Dong²

(1. Naval Equipment Department, Chengdu 610110, China; 2. No. 167 Factory, Chengdu 610110, China)

Abstract: Aiming at the problem of accurately calculating the temperature change of gun barrel in the design of gun barrel, a simple algorithm for the heat absorption of gun barrel was proposed. This paper briefly analyzes the energy conversion in gun barrel shooting, verifies it with the gun barrel data of a scientific research product, analyzes the influence of gun barrel heating, and introduces the gun barrel ablation life, the standard of ablation life termination, the cooling measures and the measures to improve the gun barrel life. The experimental results show that the algorithm is feasible and can provide a reference for barrel design.

Keywords: gun barrel; barrel heating; simple calculation; influence analysis

0 引言

炮身是火炮的重要组成部分, 主要承担着承受火药燃气压力以及导引弹丸运动、赋予一定初速的作用。身管是炮身的关键零部件, 主要承受高压火药燃气的作用, 从而赋予弹丸一定的初速和射向。身管内部膛线的存在还能使弹丸在出口时获得旋转的速度, 从而保证其在大气中的稳定性^[1-3]。在设计火炮身管时, 需要考虑射击过程中身管温度的变化对于身管刚度和强度的影响, 但精确计算身管温度变化是非常复杂的。在方案设计阶段, 需要删繁就简, 采用简易算法来快速得出初步结果, 再加上一定的安全系数, 以确保设计方案的可行性。笔者介绍了一种简易的身管发热算法, 供大家探讨使用。

1 射击过程中身管内能量的转换形式

内弹道过程是一个复杂的能量转换过程, 其中火药燃烧会释放大量高温高压的气体。同时, 弹丸会在火药燃气的作用下被挤进膛线, 克服摩擦力的同时呈直线或弧线运动以及绕弹膛轴线旋转, 而未燃烧完的火药、火药燃气以及炮身也会同时运动。其中高温火药燃气会向火炮身管传递热量。整个内

弹道过程中, 能量存在的形式大体可分为 7 种^[4]:

- 1) 弹丸直线运动所具有的能量 E_1 , 即弹丸的动能 $mv^2/2$;
- 2) 弹丸旋转运动所具有的能量 E_2 ;
- 3) 弹丸克服摩擦阻力所消耗的能量 E_3 ;
- 4) 火药及火药燃气的运动能量 E_4 ;
- 5) 身管和其他后坐部分的后坐运动能量 E_5 ;
- 6) 弹丸挤进膛线所消耗的能量 E_6 ;
- 7) 火药燃气通过身管、药筒及弹丸向外传递的能量 E_7 。

以上 7 种能量形式都是由高温高压火药燃气的热能转换而来。身管壁的发热过程有这样的特点: 身管的每一单发射击中总共约 0.01 s 的时间间隔获得热能。由于发射时间短促, 只有紧贴于膛膛表面的薄金属层吸收火药气体的热量, 随后再传给身管的金属壁。

2 射击过程中身管发热的简便算法

假设热传递过程是稳定的, 而 $T_{CT}/T=\text{const}$, 则单发的热量可按牛顿公式确定:

$$\Delta Q = \int_0^t \alpha F(T - T_{CT}) dt = \frac{v\sigma}{R} \int_0^t F p dt. \quad (1)$$

收稿日期: 2024-05-17; 修回日期: 2024-06-25

第一作者: 伍鹏宇(1988—), 男, 四川人。

式中： $F=\pi dl$ 为弹后空间内膛表面面积， m^2 ； l 为弹后空间的长度； $v=1-T_{CT}/T=0.7$ 为火药气体和身管壁的相对温度梯度； T_{CT} 和 T 分别为炮膛表面的温度和火药气体的温度； α 为放热系数。

火炮身管的比例系数：

$$\sigma=418.68\sim 209.34 \text{ W}\cdot\text{m}/\text{kg}\cdot\text{K}。 \quad (2)$$

大致符合于 $\alpha=1163\sim 5815 \text{ W}/\text{m}^3\cdot\text{K}$ 。

实际上必须把参量 σ 和 v 看作与试验数据相符的系数，这些数据是在试验时取得的。因为 $F/W=4/d$ ，而 $\alpha=\sigma\gamma$ ，所以

$$\Delta Q=4\frac{v\sigma}{Rd}\int_0^t pWdt。 \quad (3)$$

使用的方程有：

弹丸运动方程： $\phi mv'_i = SP$ ；

火药气体状态方程： $pW=\omega_r RT$ ；

能量守恒方程(热力学第一定律)：

$$AQ\omega'_i - \Delta Q'_i = pW'_i + \frac{1}{k-1}(pW)'_i；$$

式中： $A=382 \text{ J}/\text{W}\cdot\text{s}$ 为热功当量； $\omega'_i = -\frac{S_3}{S}u_1\delta\phi mv'_i$ 为装药重量渐减速度。在 $W'_i \approx Sv$ 条件下，对恒面燃烧的装药 ($s_3 = \text{const}$)，得：

$$pW = \omega_r RT = (k-1)AQ\delta S_3 \frac{u_1}{S}\phi mv - (k-1)\frac{\phi mv^2}{2} + \omega_0 RT_0 - (k-1)\frac{4v\sigma}{Rd}\int_0^t pWdt。 \quad (4)$$

于是，按照一阶线性方程的拉格朗日通解：

$$\int_0^t pWdt = \frac{\omega_0 RT_0}{f}(1 - e^{-ft}) + e^{-ft}\int_0^t (cv - nv^2)e^{ft} dt。 \quad (5)$$

式中： $f = 4(k-1)\frac{v\sigma}{Rd} > 1$ ； $c = (k-1)AQ\delta S_3 \frac{u_1}{S}\phi m$ ；

$n = (k-1)\phi m/2$ ； T_0 为起动期时间；当热损耗的指数 it 值小时取：

$$1 - e^{-ft}/f \approx t$$

和

$$\int_0^t pWdt = \omega_0 RT_0 t + cl + (k-1)\frac{\phi m}{2}\int_0^t v^2 dt。$$

因为

$$ce^{-ft}\int_0^t ve^{ft} dt \approx ce^{-ft}v_{cp}\int_{t_0}^t e^{ft} dt = cv_{cp}\frac{1 - e^{-ft}}{f} \approx cv_{cp}t = cl；$$

$$ne^{-ft}\int_0^t v^2 e^{ft} dt \approx ne^{-ft}(v^2)_{cp}\int_0^t e^{ft} dt =$$

$$n(v^2)_{cp}\frac{1 - e^{-ft}}{f} \approx n(v^2)_{cp}t_0。$$

既然

$$(v^2)_{cp} = \frac{1}{t}\int_0^t v^2 dt = \frac{1}{t}\int_0^t v dl \approx \frac{2}{3}\frac{1}{t}v \cdot l。$$

所以

$$ne^{-ft}\int_0^t v^2 e^{ft} dt = \frac{2}{3}nv \cdot l。$$

表达式 $\int_0^t v^2 dt$ 是由曲线 $v(l)$ 和横坐标限定的面积，其范围为从 l_0 到 l ，即

$$\int_0^t v^2 dt = \int_0^t v dt \approx \frac{2}{3}v \cdot l。$$

利用上式，弹丸起动和沿炮膛运动时身管壁的蓄热量可按下式算出：

$$\Delta Q_1 = 4\frac{v\sigma}{Rd} \left\{ \left[\frac{l_n}{v_k} \omega(k-1)AQ \left(1 - \frac{2}{3}\eta_{\pi} \right) \right] + \omega_0 RT_0 (t_{\pi} + t_0) \right\}。 \quad (6)$$

式中： $(k-1)AQ = RT_0$ ； $\eta_{\pi} = \frac{1}{2}\frac{\phi mv_{\pi}^2}{AQ\omega}$ ； T_0 和 ω_0 分别为在启动时间 t_0 气体的温度和已燃过的火药质量；

$\omega = \frac{S_3}{S}\delta_1\mu_1\phi v_k$ 为装药量； v_k 为装药燃烧结束时的弹丸速度； $k=1.2$ 为绝热系数； $\omega_0 RT_0 = p_0 W_0$ 为起动期内气体的能量，由于此量微小可忽略不计。于是 ΔQ_1 表达式如下：

$$\Delta Q_1 = 4\frac{v\sigma}{Rd} = 4\frac{v\sigma}{Rd}\frac{l_n}{t_{\pi}}\omega(k-1)AQ \left(1 - \frac{2}{3}\eta_{\pi} \right)。$$
 (7)

式中： l_{π} 和 t_{π} 为弹丸运动到炮口切面断面的行程和时间。

弹丸飞出后，实际上整个后效期内身管仍在继续加热。

因为：

$$W = \text{const} = W_{\pi}。$$

故身管所获得的额外热量可用下式确定

$$\Delta Q_2 = 4\frac{v\sigma}{Rd}W_{\pi}\int_0^t p dt。 \quad (8)$$

炮膛容积

$$W_{\pi} = S(l_0 + l_{\pi})。 \quad (9)$$

式中： $l_0 = \omega/S\Delta$ 为药室的缩颈长度， Δ 为装填密度。

关系式 $p(t)$ 有下面函数

$$p = p_{\pi}e^{-ht}。 \quad (10)$$

式中： $h = \frac{gSp_{\pi}}{(\beta - 0.5)\omega v_{\pi}}$ 为火药气体流出炮膛的强度指数； p_{π} 为炮口压力。

所以：

$$\Delta Q_2 = 4 \frac{\sigma v L_c}{Rd} (\beta - 0.5) \frac{\omega}{g} v_\pi。$$

式中 $L_c = l_0 + l_\pi$ 。

假设 $v_k \approx v_\pi$ ，则总热量的关系式为：

$$Q_\Sigma = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 = 4 \frac{v\sigma}{Rd} \frac{l_\pi}{t_\pi} A Q \omega \left[(k-1) \left(1 - \frac{2}{3} \eta_\pi \right) + \left(1 + \frac{l_0}{l_\pi} \right) (\beta - 0.5) \frac{v_\pi^2}{A Q g} \right]。 \quad (11)$$

也可以用下式计算总热量：

$$Q_\Sigma = 4 \frac{\sigma v L_c}{Rd} \left[\frac{\varphi}{3} + (\beta - 0.5) \frac{\omega}{g} \right] \frac{q}{g} v_\pi。 \quad (12)$$

式中： $\varphi = \frac{1}{3} \frac{\omega}{q} + k$ 为弹丸虚拟质量系数； $\eta_\pi =$

$4q v_\pi^2 / (2g A Q \omega) \leq 0.5$ 为火炮的热效率。

3 某科研产品计算分析结果

按上式计算的 $Q_\Sigma = 4.12$ kJ。

铝的比热容为 $C = 0.88 \times 10^3$ J/(kg·°C)。

计算结果：单发弹可使膛体升温 0.68 °C。

该产品实际试验测量为 0.63~0.66 °C，与计算结果基本相符合。

注：计算值略高于实测值，可能是实际试验过程中热耗散所致，该方法将在后续试验中继续验证。

4 身管发热的影响及其冷却措施

身管的发热对射击效果有不良的影响，它们都会使火炮的战斗性能和使用性能恶化，主要表现在以下方面：

1) 膛内表面温度升高会加快膛线部的磨损，从而缩短身管的寿命。

2) 弹丸在膛内的运动中，沿膛轴的不均匀热膨胀会破坏弹丸导转部的作用，降低射击精度。

3) 当药室和膛体发热达到一定温度时，可能引发装药的自燃，导致过早发射，有时甚至会导致弹丸过早爆炸。

身管寿命可分为烧蚀寿命和疲劳寿命。疲劳寿命是主要由于疲劳裂纹扩展，直至突然破裂而失效。一般身管的疲劳寿命大于烧蚀寿命^[5-6]。

身管烧蚀寿命又称弹道寿命。炮身虽采用高强度炮钢(含铬、镍、铂、钨等多种素的合金钢)制造，

满足了炮身的工作强度要求；但是，随着发射弹数的增多，内烧蚀磨损是不可避免的^[4]。影响烧蚀磨损的主要原因为：

1) 火药燃气的高温作用。发射时膛内火药燃气温度高达 2 500~3 800 K，与膛接触，使金属温度迅速升高，造成烧蚀磨损。

2) 高温高压火药燃气的冲刷作用。由于膛面的烧蚀磨损，使弹丸与膛之间出现空隙特别是当膛管温度升高后，由于膨胀，内径增大，更使弹带与膛面的空隙增大；因此，火药燃气高速度(达 1 400 m/s 甚至更高)从弹带与膛面的空隙中冲出，也使膛磨损。

3) 弹丸对膛面的摩擦作用。弹丸在膛内运动，弹带及定心部与膛壁发生摩擦，使膛面磨损，尤其是膛线导转侧磨损更为严重。

4) 火药燃气的化学作用。火药燃气在高温高压下与膛腔金属化合，渗入金属组织内，使膛面金属变得硬脆，易于剥落而被弹丸和火药燃气冲刷带走。

以上各种作用是同时发生、互相影响的。通常将在弹药燃烧过程中产生的高温高压气体的作用下，膛内壁金属面层发生的物理化学反应称为烧蚀，导致金属表面的质量发生变化以及龟裂剥落现象的发生。而膛内壁由于长期摩擦和冲击，其尺寸和形状也会发生变化，这种变化称为磨损。当膛的烧蚀和磨损达到一定程度，就会导致弹道性能丧失，使得火炮无法满足使用要求。

烧蚀寿命是膛内主要因烧蚀而失效。烧蚀寿命终止标准包括：

1) 初速下降百分数超过规定值(5%~10%)，一般可以通过测量药室增长量来评定烧蚀寿命等级；

2) 射击密集度超过规定范围(如散布面积超过 8 倍)；

3) 膛线起始部磨损量超过规定值；

4) 膛压下降致使一定数量(30%)的弹丸不能解脱引信保险或造成连续瞎火等；

5) 弹带削光或出现横弹、近炸、早炸等。

为了控制身管的发热并确保火炮具有较高的射击精度，必须对身管进行冷却，这是防止身管热损伤和其他不良后果的最有效措施之一。由于自然冷却的效率非常低，为了提高身管的冷却效率，在小口径火炮中通常使用肋片散热器来增大冷却面积；而在中大口径火炮中，通常采用液体或其他冷却剂进行人工冷却。