

doi: 10.7690/bgzdh.2018.12.015

## 弹丸被甲材料对弹丸挤进的影响分析

侯文伟<sup>1</sup>, 杨臻<sup>1</sup>, 蓝维彬<sup>1</sup>, 龙建华<sup>2</sup>

(1. 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2. 重庆建设工业(集团)有限责任公司, 重庆 400054)

**摘要:** 为研究弹丸被甲材料对挤进过程的影响, 以某小口径步枪弹为对象进行研究。分析弹丸材料的特性, 分别以 H90 铜被甲弹和覆铜钢被甲弹为例进行挤进试验, 得到不同弹药对应的挤进力变化; 通过有限元仿真模型, 结合试验结果推导挤进过程数学模型, 并对其正确性进行验证。验证结果表明, 挤进数值分析结果与仿真结果与实验数据吻合。从分析计算结果来看, 被甲材料的不同导致挤进过程也有较大差异。

**关键词:** 挤进; 被甲; 材料; 试验; 有限元

**中图分类号:** TJ410 **文献标志码:** A

## Influence Analysis of Bullet Shell Material on Projectile Extrusion

Hou Wenwei<sup>1</sup>, Yang Zhen<sup>1</sup>, Lan Weibin<sup>1</sup>, Long Jianhua<sup>2</sup>

(1. College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Chongqing Jianshe Industry (Group) Co., Ltd., Chongqing 400054, China)

**Abstract:** Research on certain type small caliber rifle for studying the effect of projectiles on the extrusion process. The extrusion test of H90 copper beaded and copper-clad steel was taken as an example to analyze the properties of projectile materials, and get the extrusion force change corresponding of different ammunition. Using the finite element simulation model, combined with the test results, the mathematical model of the extrusion process is derived and its correctness is verified. The verification results show that the numerical analysis results and the simulation results agree with the experimental data. Judging from the results of the analysis and calculation, the difference in the material of the bullet shell causes a large difference in the extrusion process.

**Keywords:** extrusion; bullet shell; material; experiment; finite element

### 0 引言

弹丸挤进是内弹道的重要过程。挤进压力是重要参数, 直接影响内弹道过程的膛压、火药燃烧、弹丸初速和转速, 也较大程度地影响枪械的射击。

弹丸挤进是一个非常复杂的过程。在枪/弹相互作用方面: 刘国庆等<sup>[1-2]</sup>对某狙击步枪挤进力进行了研究, 定性和定量地分析弹丸参数和误差对弹丸摆角、轴向受力、膛压和初速的影响; 安俊斌等<sup>[3]</sup>分析了挤进过程中的摆动状况; 陆野<sup>[4]</sup>通过数值仿真方法, 得出了挤进阻力与弹丸初速的变化规律; 陈龙淼等<sup>[5]</sup>研究了挤进过程应变率对弹丸的影响; 樊黎霞等<sup>[6]</sup>运用弹丸有限元方法研究了挤进过程弹丸的变形规律和弹丸的残余应力。

以上研究主要针对枪/弹结构因素对挤进的影响, 对弹药材料因素的研究相对较少。笔者以某小口径步枪弹为对象进行研究, 通过理论、实验和仿真 3 种方法研究不同材料的挤进过程, 为该武器系统设计和进一步提高该武器射击精度

提供理论依据。

### 1 弹丸材料特性

弹丸的构成主要由被甲、铅套与钢芯 3 部分组成, 其中被甲与枪管内壁发生直接作用, 因此被甲的材料特性直接决定挤进过程。

弹丸被甲材料目前有 H90 铜和覆铜钢 2 种方法。H90 黄铜的含铜量为 90%, 具有力学性能良好、表面处理性能好、可镀金属及涂敷珐琅等优点, 因而主要被用来制作弹丸被甲; 覆铜钢<sup>[7]</sup>由 1 层低碳钢和 2 层很薄的黄铜构成, 具有延展性好、强度和弹性高, 有一定的密封性且摩擦系数小, 相比纯铜价格低廉等优点, 近年广泛应用在其他领域。2 种材料的化学成分如表 1、表 2 所示。2 种材料在常温下的力学性能及其他弹丸参数如表 3 所示。

表 1 覆铜钢的化学成分

| 材料名称 | 化学成分占比最大值/% |      |      |      |      |      |     |     |     |
|------|-------------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|
|      | C           | Si   | Mn   | P    | S    | Cr   | Ni  | Cu  | Al  |
| 覆铜钢  | 0.19        | 0.06 | 0.55 | 0.03 | 0.03 | 0.15 | 0.3 | 0.2 | 0.1 |

收稿日期: 2018-10-10; 修回日期: 2018-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(624010104)

作者简介: 侯文伟(1994—), 男, 山西人, 硕士, 从事兵器发射理论、机械结构设计研究。

表 2 H90 铜的化学成分

| 材料名称  | 化学成分占比最大值/% |     |      |     |    |      |
|-------|-------------|-----|------|-----|----|------|
|       | Cu          | Ni  | Pb   | Fe  | Zn | 其他杂质 |
| H90 铜 | 91          | 0.5 | 0.03 | 0.1 | 余量 | 0.2  |

表 3 弹丸材料机械性能参数

| 材料  | 密度/<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 弹性模量/<br>GPa | 泊松比  | 屈服强度/<br>MPa | 极限强度/<br>MPa |
|-----|-----------------------------|--------------|------|--------------|--------------|
| 钢芯  | 7 850                       | 206          | 0.29 | 810.0        | 975.0        |
| 钢被甲 | 7 935                       | 192          | 0.30 | 358.0        | 235.0        |
| 铜被甲 | 8 730                       | 108          | 0.35 | 112.0        | 505.0        |
| 铅套  | 11 340                      | 17           | 0.42 | 11.3         | 16.5         |

## 2 弹丸挤进试验

### 2.1 试验条件

取 2 支射弹数相同的枪管，保证弹丸在膛内行程不小于 10 mm 左右，记录弹丸挤进位移对应的挤进力。

如图 1 所示，试验采用 5.8 mm 制式铜被甲弹和覆铜钢被甲弹。其中铜被甲制式弹外形和质量与覆铜钢被甲弹基本一致，全弹主要由被甲、铅套和钢芯等构成。

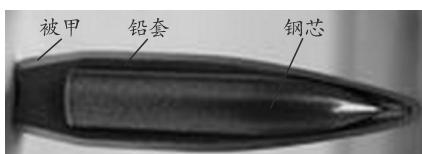


图 1 试验用弹

试验平台为万能材料试验机，如图 2 所示。试验器材包括推杆压头、夹具、力传感器和测控中心等。万能材料试验机提供挤压力，通过推杆压头挤压试验弹；当弹丸圆柱部完全挤进膛线后停止挤压，最后通过测控中心读取数据。



图 2 试验平台

### 2.2 试验结果

#### 2.2.1 弹丸刻痕

试验过程中，由于受到坡膛和膛线的挤压，被甲产生变形，且逐渐随挤进的深入，由弹性变形过

渡成塑性变形。挤进完成后弹丸外圆部形成的刻痕如图 3 所示。



图 3 被甲表面刻痕

#### 2.2.2 结果分析与讨论

挤进过程中通过压力传感器测得的挤进力变化曲线如图 4 所示。

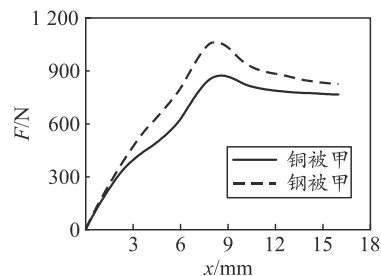


图 4 挤进力实测值

通过实测弹丸挤进力可知，弹丸在推杆压头的推动下沿枪管轴线向下运动。当弹丸圆柱部在高压作用下发生塑性变形而挤入膛线时，其被甲表面的变形阻力随挤进膛线的深度加深而增加。当弹丸圆柱部完全挤进膛线后，受到的阻力最大，此后由于被甲表面不再产生塑性变形，挤进力减小。从图 4 可见，因钢被甲材料屈服强度更高，使其产生塑性变形需要的力更大。因此，钢被甲弹较铜被甲弹挤进力大，其变化程度也较铜被甲弹明显。

## 3 挤进数学模型建立

### 3.1 基本假设

弹丸挤进过程以弹丸前端面刚接触坡膛时刻作为起点。在火药气体压力作用下，弹丸向前运动，随着挤进过程的加剧，枪管材料将会处于屈服或流动状态。由于弹丸的弹带大于枪管内径，在挤进过程中阳线会在弹体表面留下刻痕。在挤进过程建模时，作如下假设：

- 1) 挤进过程中，弹丸与坡膛之间应力的保持恒定；材料的屈服极限值为准静态实验下的  $\bar{\sigma}_f$ 。
- 2) 接触面决定挤进力的变化，即  $F = \bar{\sigma}_f \cdot S$ ，其中  $S$  为接触面积。

3) 由于研究的弹丸体最大直径超过阴线直径，认为接触发生在阴线与阳线的圆周线上及其导转侧表面。随后，由于阳线推挤下来的材料填入阴线，接触也会在阴线上出现。该情况下，挤进力-行程曲线上升斜率开始很低，后来会突然间断式地上升。

4) 将弹丸头部与膛膛接触点和弹丸圆柱部前端作斜坡面简化。

在上述假设条件下, 确定挤进力与位移的关系, 弹头弧形部前倾角  $\alpha$  和膛膛锥角  $\varphi$  的关系, 其中  $\alpha$  分为大于  $\varphi$  和小于  $\varphi$  2 种情况考虑。

### 3.2 挤进力建模

文献[1,8]给出了 7.62 mm 狙击步枪弹和火炮弹带挤进力的计算方法, 并结合该步枪弹的结构, 建立挤进过程的数学模型。简化后的结构如图 5, 其中:  $d_0$  为阳线直径,  $d_1$  为阴线直径,  $d_p$  为弹头最大外圆直径,  $\varphi$  为膛膛锥角,  $\theta$  为膛线缠角,  $\alpha$  为弹头弧形部前倾角,  $\mu_n$  为静摩擦系数,  $a$  为阳线宽度,  $b$  为阴线宽度,  $\sigma_f$  为材料在准静

态实验下的屈服强度。

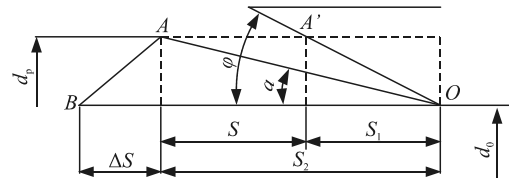


图 5 挤进结构

由结构特点, 把挤进过程分为 4 个阶段:

- 1) A 点到 A' 点, 其位移  $l_1 = s = s_2 - s_1$ ;
- 2) A 点到 O 点, 其位移  $l_2 = s_2$ ;
- 3) B 点到 O 点, 弹丸连同延伸部分全部挤进身管, 即位移  $l_3 = s_2 + \Delta s$ ;
- 4) 弹丸完全挤进膛线, 位移  $l_4 > s_2 + \Delta s$ 。

每一阶段对应的挤进阻力  $F_x$  表达式分别为:

$$F_{x1} = \sigma_f \pi (\mu_n \cos \phi + \sin \phi) \left( d_0 + \frac{s_1 x}{l_1} \tan \phi \right) \frac{s_1 x}{l_1 \cos \phi} + \frac{\sigma_f c \mu_n x}{\cos \theta - \mu_n \sin \theta} (0 \leq x \leq l_1);$$

$$F_{x2} = \sigma_f \pi (\mu_n \cos \phi + \sin \phi) (d_0 + s_1 \tan \phi) \frac{s_1}{\cos \phi} + \frac{\sigma_f c \mu_n x}{\cos \theta - \mu_n \sin \theta} (l_1 \leq x \leq l_2);$$

$$F_{x3} = \sigma_f \pi (\mu_n \cos \phi + \sin \phi) \left( d_0 + \frac{s_2 + \Delta s - x}{\Delta s} s_1 \tan \phi \right) \frac{s_2 + \Delta s - x}{\Delta s} \frac{s_1}{\cos \phi} + \frac{\sigma_f c \mu_n x}{\cos \theta - \mu_n \sin \theta} (l_2 \leq x \leq l_3);$$

$$F_{x4} = \frac{\sigma_f c \mu_n l_3}{\cos \theta - \mu_n \sin \theta} (x > l_3)。$$

以上各式中  $c = \left( \frac{a}{a+b} d_0 + \frac{b}{a+b} d_1 \right) \pi$ 。

### 3.3 被甲表面刻槽数学模型

被甲挤进过程可采用 Johnson-Cook 塑性以及断裂失效模型。其屈服应力本构模型表达式<sup>[9-10]</sup>为:

$$\sigma = (A + B \varepsilon_p^n) (1 + C \ln \varepsilon^*) (1 - T^{*m})。$$

式中:  $A$  为材料在准静态实验下的屈服强度;  $B$ 、 $n$  为应变强化参数;  $C$  为经验性应变率敏感系数;  $m$  为温度软化指数;  $\varepsilon_p$  为等效塑性应变;  $\varepsilon^*$  为无量纲的等效塑性应变率; 相对温度:

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}。$$

式中:  $T_r$  为参考温度 (通常取室温);  $T_m$  为材料的熔化温度 (常态下)。由于主要研究常温下的本构关系, 没有进行不同温度下的挤进分析, 因此不考虑相对温度及参数  $m$ 。不同材料的 J-C 模型参数如表 4 所示。

表 4 不同材料的 J-C 模型参数

| 材料 | A/MPa | B/MPa  | n     | C     |
|----|-------|--------|-------|-------|
| 铜  | 112   | 505.00 | 0.420 | 0.009 |
| 钢  | 742   | 643.54 | 0.446 | 0.055 |

## 4 挤进过程仿真分析

### 4.1 有限元模型建立

为了保证精度, 重点研究弹壳与内膛, 故用八节点六面体减缩积分单元 C3D8R, 单元网格尺寸为  $0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm}$ 。由于铅套材质相对较软, 导致挤进时变形不明显, 因此对挤进过程影响不大, 故分析时的网格类型采用四节点四边形单元 C3D4, 单元网格精度为  $0.15 \text{ mm}$ 。钢芯被铅套包裹, 挤进时铅套吸收了大部分挤进力, 对钢芯的影响非常小, 故网格类型采用四节点四边形单元 C3D4, 单元网格精度为  $0.5 \text{ mm}$ 。膛线网格划分、弹丸被甲网格划分如图 6、图 7 所示。

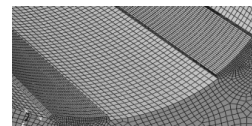


图 6 膛线网格划分



图 7 弹丸被甲网格划分

挤进中身管作为弹丸挤进的外部约束，而身管在火药燃气热冲击作用下，材料机械性能发生变化；同样，弹底在受到热冲击时产生的温度变化而导致材料性能的变化，即不同的温度下挤进也不同。仿真分析时，需要建立多个温度状态下的挤进模型。计算时只取了枪管的一部分。为了使弹丸完全挤进枪管，而且不影响最后求出的挤进压力，对弹丸施加位移载荷。位移-时间关系曲线如图 8。

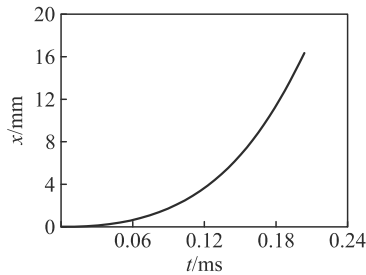


图 8 位移-时间曲线

#### 4.2 仿真结果

通过对被甲表面应力分析，得到弹丸表面应力分布规律。以枪管坡膛为研究对象，通过研究不同被甲材料的弹丸对坡膛的作用，分析坡膛表面、阳线导转侧与阴线应力分布，从而得出不同被甲材料弹丸的挤进阻力的变化规律如图 9—图 11。

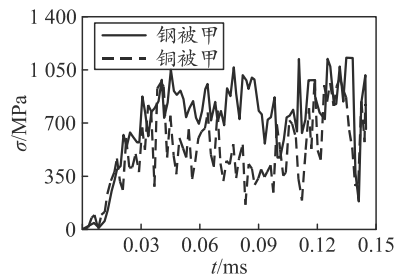


图 9 坡膛某处表面应力曲线

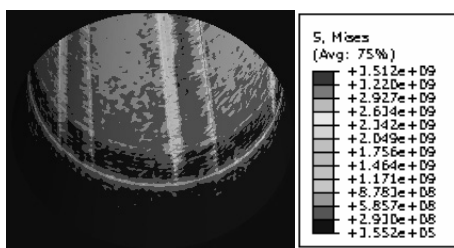


图 10 射击 H90 铜被甲弹坡膛表面应力分布

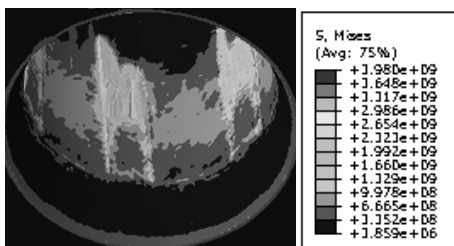


图 11 射击覆铜钢被甲弹坡膛表面应力分布

#### 4.2.1 坡膛某处受力分析

在枪弹挤进过程中，弹丸受到的力有坡膛阻力  $F_1$ 、阴线阻力  $F_2$  和导转侧作用阻力  $F_3$ 。这 3 种力的合力构成挤进阻力

$$F_z = F_1 + F_2 + F_3,$$

$$\tau_1 = \mu \delta_1, \tau_2 = \mu \delta_2, \tau_3 = \mu \delta_3.$$

式中： $\delta_1$ 、 $\tau_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\tau_2$  和  $\delta_3$ 、 $\tau_3$  分别为在接触面上接触应力分量； $\mu$  为摩擦系数。

图 12 为挤进过程弹丸的受力图，其中， $\alpha$  坡膛角， $\beta$  为导转侧角度， $\eta$  为膛线缠角。由图可得沿弹轴方向的挤进阻力大小分别为：

$$F_1 = \int_{S_1} (\sigma_1 \sin \beta \cos \eta + \tau_1 \cos \beta \cos \eta) dS_1;$$

$$F_2 = \int_{S_2} (\sigma_2 \cos \alpha \sin \eta + \tau_2 \cos \eta) dS_2;$$

$$F_3 = \int_{S_3} \tau_3 dS_3.$$

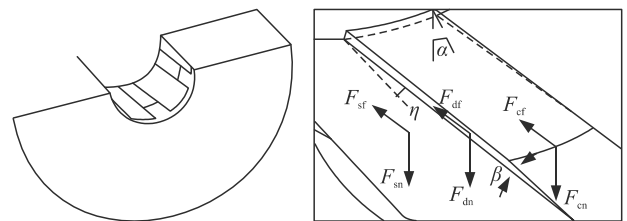


图 12 挤进过程受力

挤进过程中枪管与被甲接触。由力作用的性质，可将枪管所受的力看作是弹丸所受的挤进阻力。从图 10、图 11 可看出：坡膛阳线导转侧主要提供使弹丸旋转的力，所以阳线导转侧所受力比阳线另一侧大。根据上述计算公式，可得到枪管的受力，由枪管所受的力等于弹丸所受的挤进阻力，得到弹丸挤进阻力随时间的变化规律如图 13 所示。

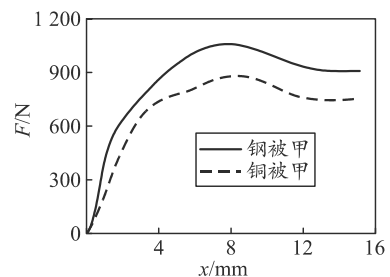


图 13 挤进阻力变化曲线

#### 4.2.2 被甲表面应力分析

取能表达膛线刻痕形成过程的各个阶段特征的图，并按弹丸位移行程展示，如图 14、图 15 所示。随着弹丸不断地挤进枪管，弹丸被甲膛线刻痕逐渐加深成形。图 16、图 17 为被甲应力分布。不同被甲材料应力曲线如图 18 所示。

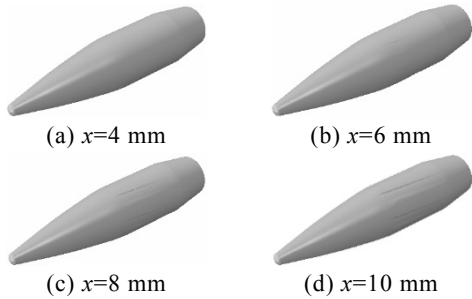


图 14 H90 铜被甲弹膛线刻痕形成过程

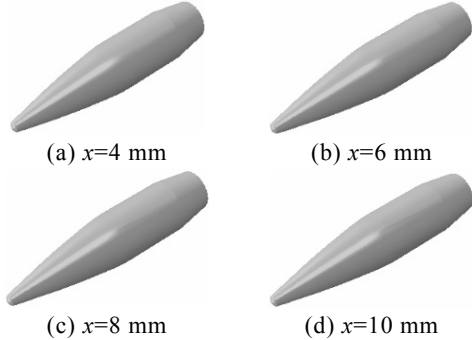


图 15 覆铜钢被甲弹膛线刻痕形成过程

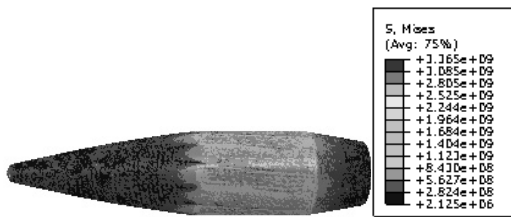


图 16 覆铜钢被甲弹被甲应力分布

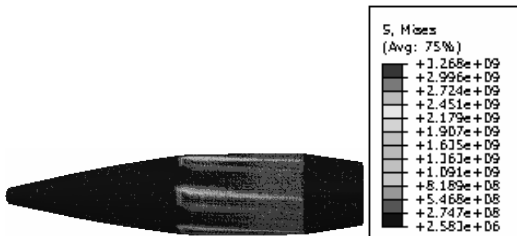


图 17 H90 铜被甲弹被甲应力分布

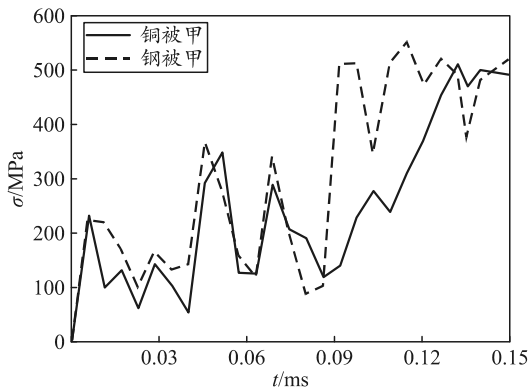


图 18 被甲表面应力曲线

由上图可知，挤进时期不同被甲材料表面应力有不同的分布。由于材料屈服极限不同，被甲刻痕

效果也不同。铜被甲刻痕效果比钢被甲明显，但是钢被甲弹表面应力比铜被甲弹大。

### 4.3 结果分析与讨论

如图 7 和图 8 所示，按照挤进时的弹丸行程，用发生明显变形之后的网格图来显示被甲刻槽的产生过程。由图 14(a)和图 15(b)分别表示在弹丸位移 4 mm 和 6 mm 之前，铜被甲和钢被甲表面变形一直处于较低的水平，即在这一刻之前，只产生了弹性变形，还未发生材料的断裂破坏；图 14(b)和图 15(c)显示，铜被甲弹和钢被甲弹分别位移 6 mm 和 8 mm 时，被甲表面部分区域产生了材料失效断裂，出现变形刻槽。

根据牛顿第二定律，可以得到挤进过程的运动方程：

$$F_z = Sp_d - ma。$$

式中： $F_z$  为弹丸挤进阻力； $S$  为弹丸底部面积； $m$  为弹丸质量； $a$  为弹丸加速度。

## 5 结论

笔者以某小口径步枪为研究对象，进行弹丸的挤进试验，建立挤进数学模型和有限元仿真分析模型，通过分析模型的结果，得到如下结论：

- 1) 对某枪弹挤进过程的理论分析表明在枪管内膛结构尺寸、材料、温度与弹丸结构尺寸、装药等参数一定的情况下，挤进阻力与材料特性和挤进位移有关。
- 2) 被甲材料的力学性能对挤进阻力有较大影响。钢被甲的材料弹性模量与屈服极限较高。为了使弹丸能完全挤进膛线，就需要更大的推动力，同时也使得发生材料塑性变形需要的时间不同，从而导致 2 种弹的启动压力也不同。

3) 通过建立的弹头挤进过程数学模型，经过试验和有限元仿真计算验证可知，挤进力变化和大小分布合理，具备一定的可信性，证明了该方法能够计算小口径步枪弹丸挤进力。

### 参考文献：

[1] 刘国庆，徐诚. 狙击步枪弹准静态弹头挤进力研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(10): 1528-1535.

[2] 刘国庆，徐诚. 弹药参数及误差对弹头膛内运动的影响研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2017, 38(1): 1-6.

[3] 安俊斌，李强，李世康，等. 某大口径枪械弹丸挤进坡膛过程的仿真分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2017, 38(1): 1-6.

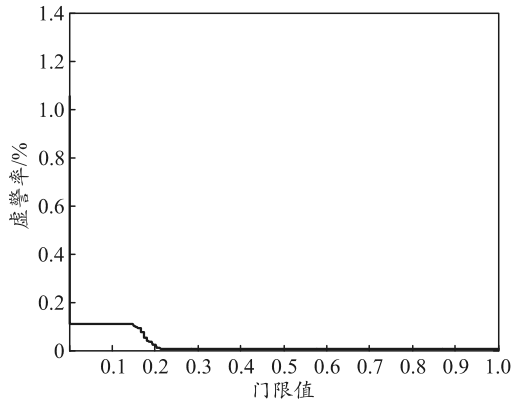


图 3 融合漏警率  $\alpha_0$  和阈值  $\lambda$  的相关曲线

在获取了门限之后，利用式(5)对随机生成的 10 000 组数据进行统计，融合漏警率如表 1 所示。

表 1 混合信源漏警率仿真实验结果 %

|       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 实验次数  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 融合漏警率 | 0.010 | 0.014 | 0.014 | 0.013 | 0.010 |
| 原始漏警率 | 10.05 | 9.92  | 10.04 | 9.99  | 9.84  |
| 实验次数  | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| 融合漏警率 | 0.010 | 0.016 | 0.005 | 0.01  | 0.015 |
| 原始漏警率 | 9.90  | 9.89  | 10.05 | 9.96  | 9.83  |

从结果可以看到：与单个报警器相比，混合信源的融合算法漏警率明显下降，由平均 9.95% 下降到 0.012%。与点源信源相比，混合信源在信源数量减少的情况下，融合漏警率更小。分析其可能的原因是遥测信源可以在一定的时间范围内对同一云团

\*\*\*\*\*

(上接第 62 页)

[4] 陆野, 周克栋, 赫雷, 等. 坡膛结构参数对枪械内弹道挤进时期的影响研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(7): 1363-1369.

[5] 陈龙淼, 林贵, 李淼. 弹丸高速挤进过程动态试验设计与分析[J]. 南京理工大学学报, 2015, 39(2): 139-143.

[6] 樊黎霞, 何湘玥. 弹丸挤进过程的有限元模拟与分析[J]. 兵工学报, 2011, 32(8): 963-969.

[7] 袁永立, 何国求, 张玉刚, 等. 覆铜钢拉伸性能与显微

进行异步检测，增加了有效检测数据的数量，从而减少了检测错误的概率。

### 4 结束语

点源信源和远程遥测信源的混合部署是未来战场上防化侦察装备运用的主要方式。笔者分析了混合信源检测融合算法的主要特点，并设计了基于 N-P 准则和异步判决的融合算法来解决混合信源的分布式检测问题。数值仿真结果表明：该算法能够显著降低漏警率，对准确检测战场化学危害情况具有重要作用。

### 参考文献:

[1] 胡学海, 王厚军, 黄建国. 分布式目标检测融合决策优化算法[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(3): 375-379.

[2] 李勇, 汪立新, 相威. 基于门限自适应的分布式检测融合算法[J]. 计算机仿真, 2009, 26(1): 343-345.

[3] 陈金周, 陈海平, 王玄玉, 等. 化学武器效应及销毁[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2002: 150-155.

[4] 纪军, 黄启斌, 丁学全. 国外化学毒剂检测器技术与评价[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 27-40.

[5] 夏美文. 基于双 MCU 的多通道信号检测模块[J]. 兵工自动化, 2017, 36(3): 20-23.

[6] VISWANATHAN R, VARSHNEY P K. Distributed detection with multiple sensors I. Fundamentals[J]. proceedings of the IEEE. 1997, 85(1): 54-63.

结构分析[J]. 金属功能材料, 2012, 19(2): 47-54.

[8] 周彦煌, 王升晨. 两相流内弹道学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990: 31-60.

[9] 王鹏, 杨国来, 葛建立, 等. 基于 Johnson-cook 本构模型的弹带挤进过程数值模拟[J]. 弹道学报, 2015, 27(2): 55-61.

[10] 李磊, 张先锋, 吴雪, 等. 不同硬度 30CrMnSiNi2A 钢的动态本构与损伤参数[J]. 高压物理学报, 2017, 31(3): 239-248.