

# 可变形小口径枪弹的侵彻特性研究

梁化鹏, 沈培辉, 薛建锋, 章程浩

(南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

**摘要:**为提高子弹的杀伤性,在标准小口径枪弹的基础上进行了新弹型的设计;利用 LS-DYNA 软件对开花弹和标准弹入水过程进行数值模拟,得到了两种不同弹型的头部变形图像和他们的速度衰减曲线、位移曲线以及相对动能曲线;最后进行了开花弹侵彻水介质的试验研究。结果表明:开花弹头部变形更大,呈花瓣状,且在低侵彻性和高杀伤性方面均优于标准弹。

**关键词:**标准弹;开花弹;高杀伤;低侵彻

**本文引用格式:**梁化鹏,沈培辉,薛建锋,等.可变形小口径枪弹的侵彻特性研究[J].兵器装备工程学报,2016(12):64-67.

**Citation format:**LIANG Hua-peng, SHEN Pei-hui, XUE Jian-feng, et al. Study on Warhead Deformation and Penetration Characteristics of a New Type of Bullet[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(12):64-67.

中图分类号:TJ410.2

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2016)12-0064-05

## Study on Warhead Deformation and Penetration Characteristics of a New Type of Bullet

LIANG Hua-peng, SHEN Pei-hui, XUE Jian-feng, ZHANG Cheng-hao

(National Key Laboratory of Fundamental Science on Smart Ammunition Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to improve the bullet destruction, the design of the new type of bullet based on the standard small bore bullet was proposed. The numerical simulation of the process of water penetration about shrapnel standard projectile was performed using LS-DYNA, and we got two different bullet head deformation image and obtained their velocity attenuation curve, displacement curve and relative kinetic curve. Finally, the experimental study on the penetration of water about the shrapnel was provided. The results show that the warhead of the shrapnel has greater deformation than the standard projectile, and likes flower petal and is better than standard ammunition in the low penetration and high destruction.

**Key words:** standard ammunition; shrapnel; high destruction; low penetration

目前,国内武装贩毒、劫持人质和抢劫银行等恐怖活动不断出现,为应对这些危险的武装犯罪事件,同时从保护民众和警察自身安全的要求考虑,需要一些杀伤效果大、侵彻力低的武器装备,以达到使罪犯丧失活动能力的目的。而我国目前主要的警用武器装备均存在穿透力太大,毁伤效果不明显的缺点,使罪犯中弹后仍然具有反抗能力,造成罪犯杀害人质或引爆炸弹的可能性加大。国外警方在遇到这种紧急情况时都会使用特制的低侵彻手枪弹头<sup>[1]</sup>。基于这种背

景,本文设计了一种新型小口径枪弹,该弹击中目标后弹体头部会向外开裂,故名为“开花弹”,具有低侵彻高毁伤的特性。通过对“开花弹”的毁伤特性进行数值模拟和试验研究,使之具有比标准弹更好的军用价值。

### 1 理论分析

为满足工程要求,减小分析研究的难度,提出如下假设:

弹丸为轴对称回转体;水中环境稳定,以准定常流处理弹丸在水中运动;忽略弹丸在水中运动时的浮力。

弹丸以初速  $v_0$  侵彻水介质,根据牛顿第二定律,弹体在水中运动时有以下方程:

$$m \frac{dv_p}{dt} = F = mg - \frac{1}{2} \rho_w A_0 C_d v_0^2 \quad (1)$$

式(1)中: $m$  表示弹体质量, $v_p$  为水中弹丸速度, $F$  为弹丸在水中所受合力, $\rho_w$  为水密度, $A_0$  为弹体最大横截面积, $C_d$  为阻力系数<sup>[2]</sup>。

高速侵彻条件下,可忽略重力效应,故式(1)可变为

$$m \frac{dv_p}{dt} = F = - \frac{1}{2} \rho_w A_0 C_d v_0^2 \quad (2)$$

实际上,在弹丸入水过程中,阻力系数与空泡数有关,且随着弹丸初速和头部形状变化而变化。由于空泡是在弹丸头部开始发展起来的,由于空心弹在弹丸头部设有凹槽,导致其入水后空泡数明显大于标准弹,使阻力系数  $C_d$  增大,同时入水后弹丸头部向外开裂,增大弹体的最大横截面积  $A_0$ ,因此开花弹入水过程中受到的阻力大于标准弹。

通过式(2)积分,得到侵彻速度随时间衰减的关系式:

$$\frac{v_p}{v_0} = - \frac{1}{1 + bv_0 t A_0 C_d} \quad (3)$$

式(3)中: $b = \rho_w / 2m$  为速度衰减系数。可见,开花弹的侵彻速度衰减的速率明显高于标准弹。

积分式(3)可得侵彻距离  $x_p$  与时间的关系式:

$$x_p = - \frac{\ln(1 + bv_0 t A_0 C_d)}{b} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可得侵彻距离和侵彻速度的关系式:

$\frac{x_p}{v_0} = \exp(-bC_d A_0 x_p)$ , 该式即为弹丸侵彻水介质的理论计算公式。

## 2 数值模拟

### 2.1 有限元建模及算法

弹头入水的三维有限元模型如图1所示。其中,弹头没在空气中,空气和水的边界采用无反射边界,空气和水的接触面采用的是共节点。

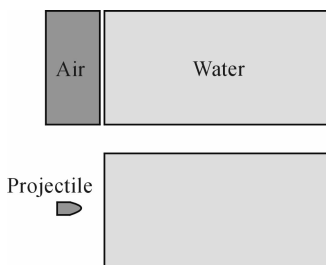


图1 弹头入水的有限元模型

弹头由紫铜构成,保证了弹体材料的一致性。在算法的选择上:紫铜选用的是 Lagrange 算法,空气和水选用的是欧拉算法,弹头和水之间采用的是耦合算法<sup>[3]</sup>。

### 2.2 材料模型和状态方程

在材料模型的选择上,空气和水采用的是 LS-DYNA 提供的 MAT\_NULL 流体模型(图2)。紫铜选用的是 Johnson-Cook 材料模型,这种本构方程考虑了高速下的应变率效应和温度效应,适用于高速下的流固耦合。在状态方程的选择上,紫铜、空气和水都采用的是 Gruneisen 状态方程<sup>[4-6]</sup>。

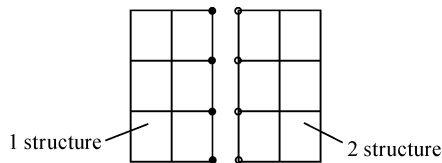


图2 结构和流体界面

弹体和靶板均采用 Johnson-Cook 模型。Gruneisen 状态方程的压力表达式为

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (s-1) \mu \right]^2} + (\gamma_0 + a \mu) U \quad (5)$$

式(5)中, $\rho_0$  为初始密度, $u$  为内能, $u = \rho / \rho_0 - 1$ , $\rho$  为当前密度, $C$ 、 $S$ 、 $\gamma_0$  和  $a$  为材料参数,见表1。

Johnson-Cook 强度模型的表达式:

$$Y = (A + B \varepsilon_p^n) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*) (1 - T_H^m) \quad (6)$$

式(6)中, $\varepsilon_p$  为等效塑性应变, $\dot{\varepsilon}_p^*$  为塑性应变率, $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $n$ 、 $m$  为材料常数, $T_H$  为相应的温度,关系式为

$$T_H = \frac{(T - T_{room})}{(T_{melt} - T_{room})} \quad (7)$$

式(7)中, $T_{melt}$  为材料融化温度; $T_{room}$  为室温。材料状态方程参数如表2所示。

表1 弹体材料参数

| 材料 | $\rho / (g \cdot cm^3)$ | $A / MPa$ | $B / MPa$ | $C$   | $n$  |
|----|-------------------------|-----------|-----------|-------|------|
| 紫铜 | 8.96                    | 90        | 292       | 0.025 | 0.31 |

表2 材料状态方程参数

| 材料 | $\rho / (g \cdot cm^3)$ | $C / (m \cdot s^{-1})$ | $S_1$ | $S_2$  | $\Gamma_0$ | $a$  |
|----|-------------------------|------------------------|-------|--------|------------|------|
| 紫铜 | 8.96                    | 3 940                  | 1.489 | 0      | 2.02       | 0.47 |
| 空气 | 0.001 5                 | 344                    | 0     | 0      | 1.4        | 0    |
| 水  | 0.998                   | 1 650                  | 1.92  | -0.096 | 0.35       | 0    |

## 3 仿真结果比较

### 3.1 弹体入水后产生的变形

标准弹和开花弹的结构简图如图3所示,为保证两种弹体具有相同的动能,增大了标准弹的长度。

标准弹和开花弹入水后产生的变形过程见图4、图5,时间间隔为  $100 \mu s$ 。弹头入水速度为  $800 m/s$ 。经过变形比较

可以看到,标准弹头部变形很小,头部出现墩粗,而开花弹则绽裂成蘑菇形状,损伤面加大。

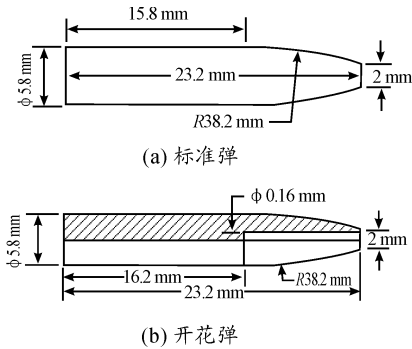


图3 弹体结构简图



图4 标准弹



图5 开花弹

这是由于开花弹在弹丸头部开有矩形凹槽,如图3所示。开花弹在侵彻靶体过程中,弹体头部受到很大的压力,产生变形,并不断压缩头部空腔,产生沿弹丸径向的剪切力,同时,使弹丸头部矩形槽的边界处产生拉应力。随着弹丸头部变形增加,空腔不断被压缩,横向力增大,拉应力也不断增大,最后使矩形槽边界处被拉断,头部向外开裂。开裂部分在压力作用下向后翻转,形成“花瓣”,稳定侵彻阶段弹丸最大横截面积达到弹体直径2倍。而标准弹由于头部未设有凹槽,在侵彻过程中头部不断墩粗,稳定侵彻阶段弹丸最大横截面积为弹体直径的1.25倍。根据式(2)和式(3)可知,弹丸最大横截面积越大,弹丸在水中所受阻力越大,侵彻速度随时间衰减越快。

### 3.2 弹头入水速度衰减和位移比较

图6为2种弹型的速度衰减曲线,图7为2种弹型的位移曲线。从曲线中可以看出,在0.02~0.07 ms时,开花弹的速度高于标准弹,这是因为侵彻初期,弹丸接触水箱时,开花

弹开有凹槽,使其头部的横截面积小于标准弹,而此时开花弹头部还未开裂,弹丸与靶的接触面积小。根据式(2)可知,此时弹丸所受的阻力小,所以在这个阶段开花弹的速度高于标准弹。在0.07 ms时,开花弹和标准弹的侵彻速度相等;0.07 ms之后,开花弹的侵彻速度明显低于标准弹,且速度降低的速率更高。这是因为开花弹入水后弹体头部受到横向力发生开裂,并向四周扩张,使弹体的最大横截面积增加,阻力增大,速度降低明显。从位移曲线中也可看出,弹丸侵彻初期,开花弹的位移要大于标准弹。开花弹头部开裂后,位移增长减缓,在1.0 ms时,标准弹的位移是开花弹的1.5倍。

经过比较可得:开花弹入水后速度衰减性明显好于标准弹。

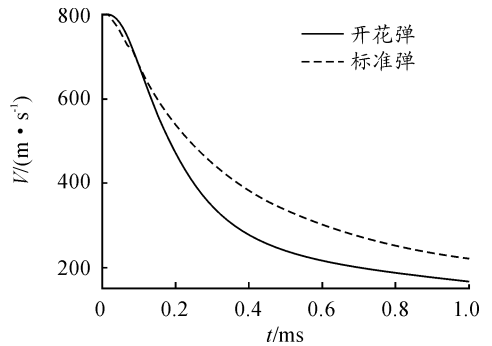


图6 速度衰减曲线

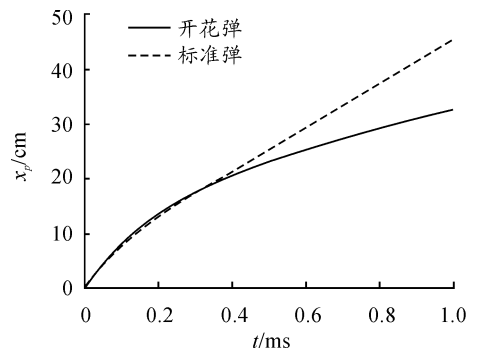


图7 位移曲线

### 3.3 弹型损伤性能比较

弹头入水后,其动能的减少将会转化为2部分能量:一部分为消耗在水中的能量,另一部分用于自身的变形。其相对动能变化为 $E = (E_0 - E_t) / E_0$ , $E$ 为相对动能变化; $E_0$ 为初始时刻弹头的动能; $E_t$ 为 $t$ 时刻弹头动能。两种弹型的相对动能变化曲线如图8所示。经过比较得,开花弹的相对动能变化是最大的。

## 4 试验结果与分析

鉴于生物组织的复杂性,本文实验中采用水介质来模拟生物组织。因为大多数生物组织含水80%左右,其密度与水相近,而且水具有均匀、透明便于直接观察的特点。以

5.8 mm弹道枪作为发射平台进行弹体侵彻水介质试验,试验现场布置如图9所示。采用XX火药作为发射药,通过装药量控制弹体着靶速度,用锡箔靶和双通道测试仪测量速度。

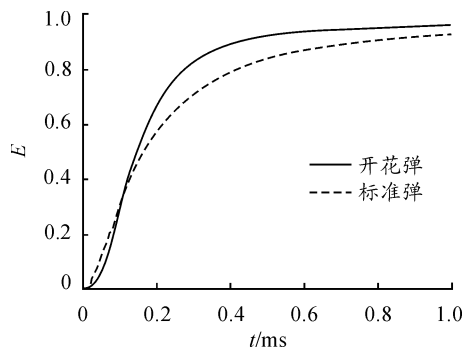


图8 相对动能变化曲线

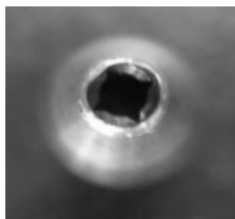


图9 试验现场示意图

试验中开花弹的直径为5.8 mm,长径比为4,质量为4.8 g,弹丸头部开有圆槽,直径为0.4 mm,凹槽边界上沿轴向设有预开槽,如图10所示。



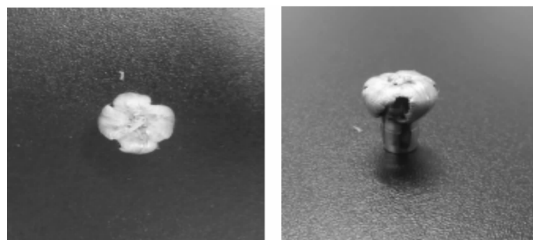
(a) 全视图



(b) 头部局部放大图

图10 试验用开花弹

试验中开花弹着靶速度为825 m/s,试验结果如图11所示,从图11可以看出,开花弹侵彻水箱后,弹丸头部开裂成4瓣,弹体剩余长度为14 mm,最大横截面积为 $10.58 \text{ mm}^2$ ,约为弹体直径的两倍。实验后在水箱中收集到弹丸残体,进一步体现了开花弹的低侵彻性能。



(a) 回收的弹体



(b) 水箱

图11 试验结果

图12为实验结果和仿真结果的对比图片,可以看出,实验中弹体变形情况与仿真结果基本吻合。回收到的弹体最大横截面积为 $10.58 \text{ mm}^2$ ,弹体剩余长度为14 mm,仿真结果中弹体最大的横截面积为 $11.03 \text{ mm}^2$ ,剩余弹体长度为13.49 mm,可见,仿真可以很好的模拟开花弹入水过程中的变形情况。

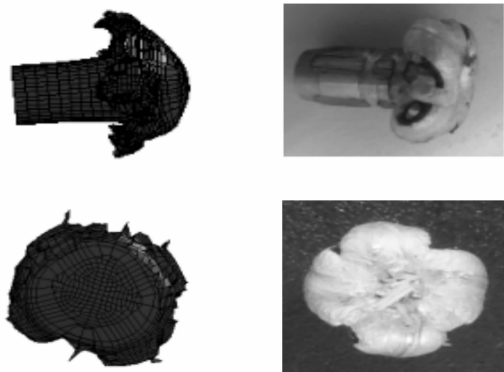


图12 试验和仿真结果对比

## 5 结论

利用LS-DYNA软件对标准弹和开花弹进行数值模拟,并对开花弹进行试验研究,得到了两种枪弹在不同工况下的侵彻特性,主要结论如下:

1) 开花弹头部绽裂成蘑菇状,稳定侵彻阶段最大横截面直径为弹体直径的2倍,损伤面加大;标准弹头部变形很小,头部出现墩粗,稳定侵彻阶段最大横截面直径为弹体直径的1.25倍。

2) 开花弹的速度衰减性和相对动能变化均好于标准弹,故在低侵彻性和高杀伤性方面开花弹是优于标准弹的。

(下转第99页)

## 参考文献:

- [1] 曹嘉涵. 打造绿色军队:美国军事能源战略调整评析[J]. 中国石油大学学报:社会科学版,2013,29(4):8-13.
- [2] 于春满,李爽. 浅谈汽车混合动力系统[J]. 中小企业管理与科技,2015(27):232-232.
- [3] JULA A,SUNDARARAJAN E,OTHMAN Z. Cloud Computing Service Composition: A Systematic Literature Review [J]. Expert Systems with Applications,2014,41(8):3809-3824.
- [4] 贺兴,艾芊. 电动汽车能量管理系统的研究与开发[J]. 低压电器,2011(14):21-25.
- [5] 徐鹏,姚引娣. 基于物联网的粮仓监测系统设计[J]. 西安邮电学院学报,2013,18(3):122-124.
- [6] 姜慧竹. 基于物联网的智能网关系统研究与实现[D]. 北京:北京工业大学,2014.

- [7] WEN J,TANG L,LIN Z, et al. Visualization Gateway System Based on Linux Qt Technology [J]. Computer Science and Application,2015(5):108-115.
- [8] 史会敏. 嵌入式以太网在农田信息远程监测系统中的应用[D]. 济南:山东大学,2013.
- [9] HENRY S. Power Generation, Distribution and Revenue Metering Using Remote Intelligent Gateway, PI Historian and Monarch SCADA system [D]. California State University, 2013.
- [10] 张毅,吴锦,罗元,等. 新型 ZigBee - WiFi 无线网关的设计及其抗干扰技术的研究[J]. 计算机应用与软件,2014,31(5):122-124.
- [11] 薄玮. 数据池建设重“质量服务”[J]. 条码与信息系统,2014(2):32-32.
- [12] 刘晓文,王龙,王存. 基于井下广播系统的 CAN 转以太网网关设计[J]. 电子技术应用,2014(2):10.

(责任编辑 杨继森)

(上接第 67 页)

## 参考文献:

- [1] 尹生. 中国反恐法制的现状、问题和对策研究[J]. 当代法学,2008,22(3):12.
- [2] 顾建农,张志宏,范武杰. 旋转弹丸入水侵彻规律[J]. 爆炸与冲击,2005,25(4):341-349.
- [3] 张雄,陆明万,王建军. 任意拉格朗日-欧拉描述法研究进展[J]. 计算力学学报,1997,14(1):91-102.
- [4] 时党勇,李裕春,张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进

行显式动力分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004:12.

- [5] YOO Y H, YANG D Y. Finite Element Modeling of the High-Velocity Impact Forging Process by the Explicit Time Integration Method [J]. Journal of Materials Technology, 1997,63(11):718-723.
- [6] LINDHOLD U S. Some Experiments with the Split Hopkinson Pressure Bar [J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1964,12:317-335.

(责任编辑 周江川)