高压物理学报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

第 32 卷 第 2 期
2018 年 4 月

高 压 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

Vol. 32, No. 2
Apr., 2018

**DOI**: 10.11858/gywlxb.20170538

# 低侵彻性枪弹的入水研究*

梁化鹏[1],薛建锋[2],沈培辉[1]

(1.南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室,江苏 南京 210094;
2.航空工业洪都 660 所,江西 南昌 330024)

**摘要**:为提高子弹的低侵彻性,研究了一种空心开花型低侵彻弹。通过进行空心开花型低侵彻弹侵彻水介质的实验,研究了弹体头部在不同速度下的变形情况;利用 LS-DYNA 软件对开花弹入水过程进行数值模拟,得到子弹在不同入射速度下的速度衰减曲线和位移曲线。研究结果表明:开花弹入水过程中的头部开裂程度与速度有关,速度越高,弹头变形越大;弹头开裂成"花瓣状"可以有效降低子弹速度,增大侵彻阻力;开花弹高速侵彻下的位移小于低速下的位移,说明开花弹具有良好的低侵彻特性。

**关键词**:开花弹;低侵彻;水介质;变形

**中图分类号**: O353.4;TJ410.2 **文献标识码**:A

目前,国内武装贩毒、劫持人质、抢劫银行等严重武装犯罪以及恐怖活动均不断出现。为应对这些危险的武装犯罪事件,需要一些停止作用大、侵彻力低的武器装备,以求能形成较高的制止犯罪能力。而我国目前主要的警用武器装备均存在枪弹的穿透力太大,导致停止作用不足的缺点。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[1]。Kneubuehl 等[2]在试验中发现,将美国 M193 步枪弹的撞击速度提升到 750 m/s 以上时,弹体在软介质中会破碎,从而达到低侵彻的效果。美国温彻斯特公司生产的"黑爪"弹,其弹体为纯黑色,射入目标后被甲会均匀地向后翻开成 6 瓣,就像 6 个带有倒钩的爪子,弹头直径最终可膨胀至口径的两倍左右。近几年国内学者也注意到了低侵彻枪弹的研究意义。李晓杰等[3]对国产 5.8 mm 口径手枪弹头进行改进,提出了新式的软尖弹和空尖弹,并与标准弹对比,使用 ANSYS/LS-DYNA 进行弹丸入水的数值仿真,得到 3 种弹型的速度、位移曲线,以及子弹入水产生的瞬时空腔,结果表明,空尖弹具有良好的低侵彻性能。金永喜等[4]提出了子弹在软目标介质内的翻滚模型,证明弹丸翻滚时产生的离心力能使子弹在撞击目标过程中头部发生破碎,从而使其侵彻深度得到明显的降低,并通过与制式枪弹的实验对比进行了论证。尽管近几年我国开始对低侵彻枪弹进行相关研究,但都仅局限在仿真或者理论的基础上,相关的实验验证少之又少,因此,本工作通过实验与仿真相结合,对低侵彻枪弹做进一步的研究。

根据创伤弹道学[5],子弹在撞击目标介质过程中,弹头的翻转、变形、破碎都能使弹头的能量更快地向介质传递。本工作研究一种空心开花型低侵彻弹。该弹击中目标后弹体头部会向外开裂,利用子弹头部在侵彻过程中产生的大变形,实现子弹的高能量传递性,使开花弹在低速侵彻下初速低、子弹头部变形小、侵彻阻力低,而在高速侵彻下初速高、子弹头部变形大、侵彻阻力高,最终达到开花弹在低速和高速侵彻条件下,侵彻深度始终控制在某一范围之内的目标。因此,该空心开花型低侵彻弹无论近距离还是远距离击中目标,都不会将其射穿,具备良好的低侵彻性能。在应对紧急情况时,只会制止犯罪人员而不会穿透目标误伤群众。

* **收稿日期**: 2017-02-21; **修回日期**: 2017-03-28
**作者简介**: 梁化鹏(1992—),男,硕士研究生,主要从事终点效应研究. E-mail:815532008@qq.com
**通信作者**: 沈培辉(1958—),男,教授,主要从事终点效应与目标毁伤研究. E-mail:sphjy8@mail.njust.edu.cn



© 2018 Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics 

# 1　弹丸入水实验

## 1.1　实验设计

鉴于生物组织的复杂性，采用水介质模拟生物组织。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 口径弹道枪作为发射平台进行弹体侵彻水介质实验，实验现场布置如图 1 所示，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。

实验中空心开花型低侵彻弹的直径为 5.8 mm，长径比为 5，质量为 5.6 g，弹丸头部开有矩形槽，边长为 2 mm，凹槽边界上沿轴向设有预开槽，如图 2 所示。



图 1　实验现场

Fig. 1　Experiment set-up

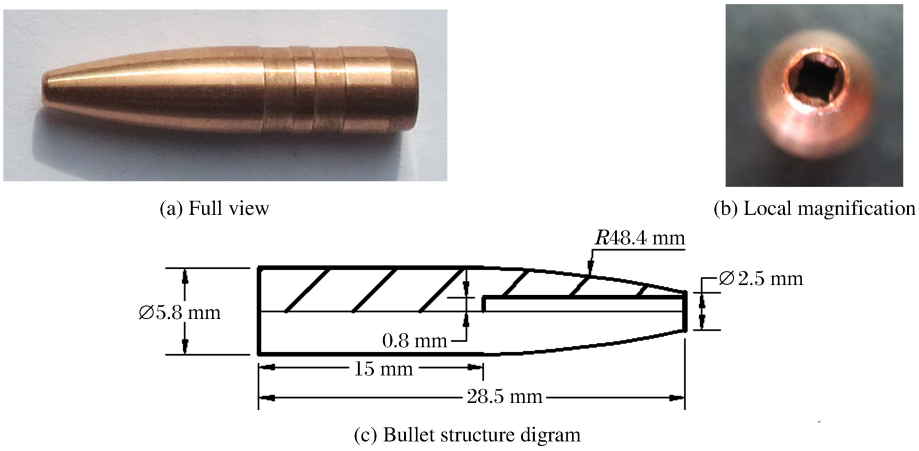



图 2　实验用开花弹

Fig. 2　Shrapnel of experiment

## 1.2　实验结果及分析

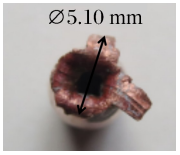
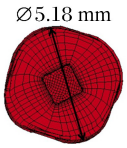
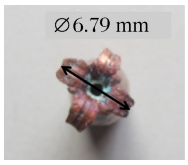
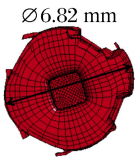
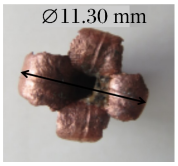
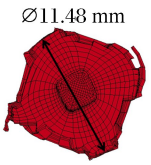
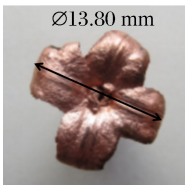
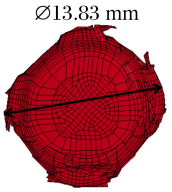
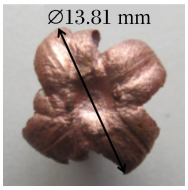
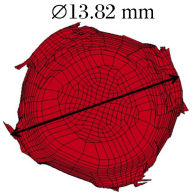
通过改变子弹的装药量，得到开花弹在撞击速度为 408、501、610、702、814 m/s 下弹丸头部的变形情况，实验结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出，开花弹入射水箱后，弹体头部发生不同程度的变形。这是由于开花弹在侵彻靶体过程中会受到较大的侵彻阻力，产生沿弹体轴向的剪切力，弹丸头部发生变形，由于弹头开有矩形凹槽，在矩形槽的轴向边界处会产生相应的拉应力，拉应力使凹槽不断向外膨胀，达到弹体材料的抗拉强度后，弹头沿矩形槽边界断裂，开裂成 4 瓣，断裂的部分在水的阻力作用下向后翻转，最后呈“花瓣状”。

对比表 1 可知，弹丸头部的变形程度与子弹撞击速度有关。在 408 m/s 较低速度下入水时，弹丸头部部分开裂，矩形槽沿径向略微膨胀。子弹以 501～610 m/s 速度入水时，弹丸头部开裂成 4 瓣并伴有外翻现象，但头部凹槽未开裂完全，仍有清晰的孔洞，此时弹丸头部最大横截面处直径为弹体直径的 2 倍。子弹以 702～814 m/s 速度入水时，弹头沿矩形槽轴向边界完全开裂成“花瓣状”，且凹槽完全消

失,此时弹丸头部最大横截面处直径达到弹体直径的 2.4 倍。因此,开花弹在低速入射时,初速低,侵彻阻力较小,弹头变形小;在高速入射时,初速高,侵彻阻力大,弹头变形大。

**表 1　实验结果和仿真结果对比**

**Table 1　Comparison of experiment and simulation results**

| Experiment | | Simulation | |
|---|---|---|---|
| Velocity/(m·s$^{-1}$) | Results | Velocity/(m·s$^{-1}$) | Results |
| 408 |  | 400 |  |
| 501 |  | 500 |  |
| 610 |  | 600 |  |
| 702 |  | 700 |  |
| 814 |  | 800 |  |

## 2　数值模拟的有限元建模及算法

弹头入水的模型如图 3 所示。弹头在空气中,空气和水的边界采用无反射边界,空气和水的接触面采用共节点方式。

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:铜选用 Lagrange 算法,空气和水选用欧拉算法,弹头和水之间采用耦合算法[6]。在材料模型的选择上:空气和水采用 LS-DYNA 提供的 MAT_NULL 流体模型;紫铜选用 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 Grüneisen 状态方程[5-7]。

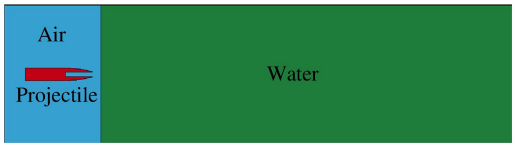



图 3　弹头入水的有限元模型

Fig. 3　Finite element model of projectile penetrating into water

## 3　仿真结果比较

### 3.1　不同速度入水的头部变形比较

使用 LS-DYNA 软件可以较理想地模拟开花弹的入水过程，图 4 为开花弹撞击水介质时弹头的变形过程。从图 4 中可以看出，开花弹撞击水介质后，弹头在侵彻阻力作用下发生变形，并沿着矩形槽发生开裂，最后以花瓣状弹头继续运动。



图 4　弹头入水的变形过程

Fig. 4　Deformation process of projectile penetrating into water

通过模拟开花弹的入水过程，得到开花弹以不同速度撞击水介质后稳定侵彻阶段的弹体变形图，并与实验结果进行对比，如表 1 所示。可以看出，仿真结果与实验中弹体变形情况基本吻合。开花弹在较低速撞击下，弹头轻微变形，矩形槽口向外扩张，但未达到开裂的程度，这是因为此时开花弹受到的侵彻阻力过小，弹头矩形槽轴向边界产生的拉应力未达到弹体材料的抗拉强度，无法使弹头开裂。开花弹以 600 m/s 速度撞击水靶时，弹头受到的拉应力达到一定强度，使头部沿槽口开裂，但从表 1 中可以看出，此时弹丸头部未完全开裂，这是由于子弹的撞击速度仍然不足，达不到子弹需要的侵彻阻力。进一步提高开花弹的侵彻速度，在 700 m/s 速度撞击下，侵彻阻力较大，弹头完全开裂成 4 瓣，矩形槽消失。

表 2 是开花弹在不同入射速度下弹丸头部最大直径的实验数据和仿真数据的对比，其中：$D_{max}$ 为弹丸头部最大直径，$\overline{D}_{max}$ 是其平均值。可以看出，实验结果和仿真结果基本吻合。开花弹速度低于 500 m/s 时，弹丸头部变形较小；速度为 500 m/s 时，弹丸头部最大直径为弹体直径的 1.2 倍；子弹速度为 600 m/s 时，弹头变形较大，弹丸头部最大直径为弹体直径的 2 倍；子弹速度达到 700 m/s 时，开花弹弹头开裂完全，变形达到极限，弹丸头部最大直径为弹体直径的 2.4 倍。弹头变形程度与实验结果一致，说明数值仿真可以较理想地模拟开花弹的入水过程。

**表 2　不同速度入水的弹丸头部变形比较**

**Table 2　Comparison of deformation of projectiles entering water at different velocities**

| Experiment | | | Simulation | |
|---|---|---|---|---|
| Velocity/(m·s$^{-1}$) | $D_{max}$/mm | $\overline{D}_{max}$/mm | Velocity/(m·s$^{-1}$) | $D_{max}$/mm |
| 408 | 5.10,5.08 | 5.090 | 400 | 5.18 |
| 501 | 6.71,6.79 | 6.750 | 500 | 6.82 |
| 610 | 11.30,11.23 | 11.265 | 600 | 11.48 |
| 702 | 13.82,13.80 | 13.810 | 700 | 13.83 |
| 814 | 13.81,13.81 | 13.810 | 800 | 13.82 |

### 3.2　不同速度入水的速度衰减比较

图 5 为开花弹在不同速度下撞击水介质的速度衰减曲线，开花弹从空气中射入水后，速度开始降低。从图 5 中可以看出，子弹的入射速度越高，速度衰减越明显。在 400 和 500 m/s 速度下，子弹速度衰减得比较缓慢，说明低速条件下开花弹头部未发生开裂，变形较小，子弹受到的侵彻阻力低，1 ms 后子弹速度分别为 182.13 和 143.58 m/s；600 m/s 速度下，子弹速度衰减的速率有所提高，此时开花弹头部已开裂，但仍未变形完全，1 ms 后子弹速度为 106.36 m/s；700 和 800 m/s 侵彻速度下，开花弹速度衰减十分明显，说明弹体头部完全开裂成“花瓣状”，与水的接触面增大，侵彻阻力高，1 ms 后子弹速度分别降低到 87.74 和 75.78 m/s。可以看出，开花弹的入射速度越高，1 ms 后子弹的速度反而越低。这是因为开花弹低速入射时，弹头开裂程度小，侵彻过程中弹体最大横截面积小，与水的接触面小，受到的侵

彻阻力低,因此速度衰减得较缓慢;随着入射速度的提高,弹头变形增大,与水的接触面增大,开花弹受到的侵彻阻力较大,导致速度衰减得更快。说明开花弹弹头开裂变形对提高子弹的侵彻阻力、降低子弹的速度起很大作用。

### 3.3　不同速度入水的位移比较

图 6 为开花弹在不同速度下撞击水介质的位移曲线。从图 6 中可以看出:开花弹以 400 m/s 入射时,1 ms 内在水中的位移是 22.13 cm;以 500 m/s 入射时位移有所增加,达到 23.55 cm。这是因为子弹的初速增大,动能变大,而开花弹以 500 m/s 速度撞击水介质时弹体头部变形很小,矩形槽口发生略微扩张,达不到增大与水的接触面,进而增大侵彻阻力的目的,所以在水中的侵彻深度有所增加。开花弹以 600、700 和 800 m/s 速度撞击水介质时,1 ms 内在水中的位移分别为 20.36、20.55 和 19.95 cm,高速撞击下子弹在水中的位移明显低于低速撞击下的位移,这是因为开花弹在较高速度下撞击水介质时,弹头发生开裂变形,呈花瓣状,弹体的最大横截面积提高 1～2 倍,增大了子弹撞击过程中与水的接触面积,极大地提高了子弹在水中受到的侵彻阻力,降低子弹的运动速度,使子弹在高速入射条件下的位移比低速入射时更低。不同速度入射下 1 ms 后子弹的位移都在 20～24 cm 范围内,由此可以说明开花弹具有良好的低侵彻特性。

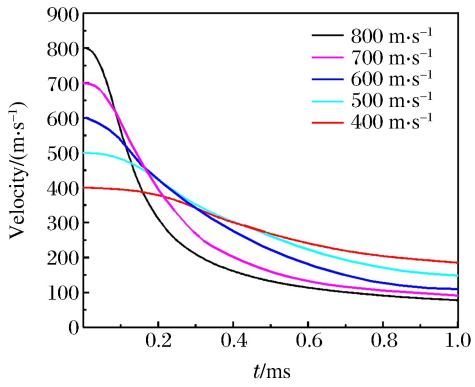



图 5　速度衰减曲线

Fig. 5　Velocity attenuation curve

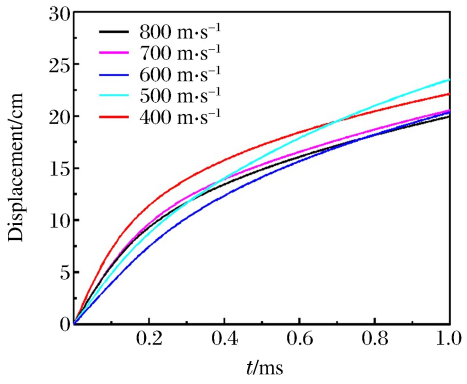



图 6　位移衰减曲线

Fig. 6　Displacement attenuation curve

## 4　结　论

对开花型低侵彻弹进行了不同速度侵彻水介质的实验研究,结果表明:开花弹以 500 m/s 以下低速撞击时,弹丸头部变形较小,弹形保持良好,稳定侵彻阶段弹头最大直径为弹体直径的 1.0～1.2 倍;以 501～610 m/s 中速撞击时,弹头发生开裂,但未变形完全,弹头最大直径达到弹体直径的 2 倍,受到的侵彻阻力较大;以 702～814 m/s 高速撞击时,弹头完全开裂,呈花瓣状,弹头最大直径达到弹体直径的 2.4 倍,受到的侵彻阻力最大。利用 LS-DYNA 软件模拟开花弹在不同速度下的入水过程,仿真结果与实验结果基本一致,说明数值仿真可以较理想地模拟开花弹的入水过程;得到了子弹的速度衰减曲线和位移曲线,表明开花弹弹头开裂变形对提高子弹的侵彻阻力、降低子弹速度起很大作用,证明开花弹具有良好的低侵彻特性。

## 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.
YIN S. A study on the China's anti-terrorism legal mechanism [J]. Contemporary Law Review,2008,22(3):12.

[2]　KNEUBUEHL B P, COUPLAND R. Wound ballistics: basics and applications [M]. Berlin: Springer Medizin GmbH,2008:128.

[3] 李晓杰,姜力,闫鸿浩,等.低侵彻手枪弹入水侵彻性能数值模拟研究 [J].爆炸与冲击,2007,27(4):319-324.
LI X J,JIANG L,YAN H H,et al. Numerical simulation on low in breaking handgun projectile drilling through the water [J]. Explosion and Shock Waves,2007,27(4):319-324.

[4] 金永喜,陈波,张敬敏,等.低侵彻步枪弹翻滚破碎机理研究 [J].兵工学报,2013,34(10):1222-1226.
JIN Y X,CHEN B,ZHANG J M,et al. Research on rolling and fragmentation mechanism of non-penetrating rifle bullets [J]. Acta Armamentarii,2013,34(10):1222-1226.

[5] 刘荫秋,王正国,马玉媛.创伤弹道学 [M].北京:人民军医出版社,1991:76-77.

[6] 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.
ZHANG X,LU M W,WANG J J. Research progress in arbitrary Lagrangian-Eulerian method [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,1997,14(1):91-102.

[7] 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,1997,63:718-723.

# Research on the Low-Penetrating Bullets Entering Water

LIANG Huapeng[1],XUE Jianfeng[2],SHEN Peihui[1]

(1. *Ministerial Key Laboratory of ZNDY*,*Nanjing University of Science & Technology*,
*Nanjing* 210094,*China*;
2. 660 *Design Institute of Hongdu Aviation Industry Group*,*AVIC*,*Nanchang* 330024,*China*)

**Abstract**: In order to reduce the bullet destruction, the design of shrapnel, a new type of bullet based on the standard small bore bullet, is proposed. We performed the experiment of water penetration of the shrapnel to study the deformation of the projectile head at different speeds, and conducted the corresponding numerical simulation using LS-DYNA and obtained the projectile's velocity attenuation and displacement curve. The results show that the degree of deformation of the projectile's head is related to its speed, the higher the speed, the greater the warhead deformation. The warhead cracking into "petals" can effectively reduce the bullet velocity, and raise the penetration resistance. The displacement in high speed penetration is less than that in low speed penetration, which indicates that the shrapnel has a good low-penetrating characteristic.

**Keywords**: shrapnel; low-penetration; water medium; deformation