

低侵彻步枪弹翻滚破碎机理研究

金永喜, 陈波, 张敬敏, 王舒, 崔海林, 谭仲于

(北京机械电气研究所, 北京 102202)

摘要: 通过分析侵彻深度控制的基本原理, 建立弹头在软质目标内的翻滚运动模型, 揭示弹头离心力破碎的物理机制; 采用数值仿真方法, 研究与明确影响弹头翻滚破碎的主要因素; 通过实验揭示低侵彻步枪弹在明胶靶标中的翻滚破碎过程。研究表明: 步枪弹弹头翻滚产生的离心力可使弹头壳产生破碎, 且弹头质心位置是影响弹头翻滚状态的重要因素, 可采用调整质心位置的方法来控制弹头的翻滚状态, 并结合提高弹头着速、减小弹头壳厚度、降低弹头壳强度等技术措施, 能够将侵彻深度比制式结构步枪弹降低 1/2, 达到低侵彻杀伤的效果。

关键词: 兵器科学与技术; 步枪弹; 失稳翻滚; 离心力; 破碎; 低侵彻

中图分类号: TJ303.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-1093(2013)10-1221-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.10.004

Research on Rolling and Fragmentation Mechanism of Non-penetrating Rifle Bullets

JIN Yong-xi, CHEN Bo, ZHANG Jing-min, WANG Shu, CUI Hai-lin, TAN Zhong-yu

(Beijing Mechanical and Electric Research Institute, Beijing 102202, China)

Abstract: The current standard military bullets have excessive penetration power at close range. After a bullet cuts through the body, its remaining energy can cause a highly lethal effect, which is unable to meet the combat requirements of counter-terrorism and anti-hijacking. So there is an urgent need to develop the non-penetration and highly lethal technology for rifle bullets. A rolling motion model of bullet in the muscles is established and the centrifugal fragmentation mechanism of bullet is revealed by analyzing the basic control principle of penetration depth. The numerical simulation is used to discuss the main factors which affect the rolling and fragmentation of bullet. The rolling and fragmentation process of non-penetrating rifle bullet in gelatin target is revealed by experiment. The research results show that the centrifugal force generated by rolling bullet can make the soft bullet crushed, and the center-of-mass position of bullet is a sensitive factor to affect the rolling of bullet. The rolling state of bullet can be controlled by adjusting the center-of-mass position of bullet, and compared with the standard rifle bullet, the penetration depth of new bullet can be reduced to 1/2 to reach the non-penetration and highly lethal effect by improving the bullet velocity and reducing the thickness and strength of bullet shell.

Key words: ordnance science and technology; rifle ammunition; instability rolling; centrifugal force; fragmentation; non-penetration

0 引言

在反劫机、劫持人质等反恐作战任务中,要求枪弹能够达到既可对恐怖分子实施击毙,又不伤及人质和无辜人员等作战目的。目前的制式军用步枪弹,其威力设计通常以杀伤效果最大化为目标。在近距离内,对人员杀伤威力足够,但穿透能力较强,对人体形成贯通伤后,还有剩余能量产生再杀伤作用,并且弹头在碰到障碍物后,容易发生跳弹造成误伤现象。为满足反恐、反劫持的作战需求,迫切需要开展低侵彻杀伤步枪弹方面的相关研究。

国内外低侵彻杀伤枪弹方面的研究及产品基本都集中在速度较低的手枪弹领域,常见结构为在弹头头部设有软尖或空心结构。弹头进入软质目标后,弹头头部在撞击作用下膨胀变形,从而增加弹头侵彻目标的作用面积,增大弹头所受阻力,降低弹头侵彻深度,实现低侵彻杀伤的作用效果。但由于步枪弹的速度、外形、结构等特征参数都与手枪弹存在较大差别(如步枪初速一般在 $750 \sim 950 \text{ m/s}$ 范围,头部为尖弧形,长径比在 $4 \sim 6$ 倍范围;手枪弹初速一般在 $200 \sim 350 \text{ m/s}$ 范围,头部为钝头或球形,长径比在 2 倍左右),所以在手枪弹领域所采用的低侵彻原理及技术途径无法适用于步枪弹。

国外在创伤弹道的研究中^[1],实验发现了 M193 步枪弹在其撞击速度达到 760 m/s 以上时,其在软质目标内会产生破碎现象,但并没有将此现象与低侵彻步枪弹设计及发展联系起来。其他步枪弹杀伤方面的理论研究主要集中在弹头在软质目标内的运动状态计算分析,如文献[2-5]对典型军用步枪弹在侵彻软质目标的运动特性进行分析计算,并建立了相应的侵彻运动模型;温垚珂等^[6]采用显示有限元方法数值模拟 SS109 型步枪弹侵彻软质目标运动过程,得出明胶瞬时空腔和能量传递量等参数。

本文以步枪弹为研究对象,在理论分析及仿真计算的基础上,揭示步枪弹翻滚破碎机理,明确影响侵彻深度的主要因素,提出控制弹头侵彻深度的技术措施。并基于步枪弹翻滚破碎机理控制侵彻深度,设计低侵彻步枪弹方案,通过实验验证方案设计及实验证明技术措施的可行性,为相关用途枪弹的设计优化提供技术方向。

1 步枪弹翻滚破碎过程理论分析

弹药对目标的杀伤作用是通过弹头直接侵彻目标实现的,侵彻过程即弹头与目标间的能量传递过程,弹头能量全部传递给目标时弹头侵彻过程结束,所以侵彻深度控制即能量传递的控制。要实现低侵彻的作用效果,就应将弹头能量尽快释放给目标。根据创伤弹道学^[7],弹头在软质目标中翻滚、变形、破碎时,可将弹头能量迅速的传递给目标。步枪弹本身的特点决定了弹头必然具备较大的初速;另外在反恐、反劫持作战中,射击距离一般在 100 m 内,弹头的着靶速度很高(一般在 700 m/s 以上),通过弹头的翻滚或变形无法达到低侵彻的作用效果,只能采用弹头在目标内破碎的方式分散杀伤元的质量,使弹头的能量释放在目标内,降低弹头侵彻深度。本文以离心力所致弹头破碎原理为切入点,开展了低侵彻杀伤步枪弹技术研究。

1.1 弹头侵彻软质目标运动模型

图 1 为弹头侵彻软质目标的受力示意图。在空气中飞行稳定的弹头,由于其章动运动特性,必然以一定的章动角度命中目标,弹头速度方向与其轴线方向将存在一定角度,所以在目标中高速运动的弹头,主要受到与运动方向相反的介质阻力和翻滚力矩作用。

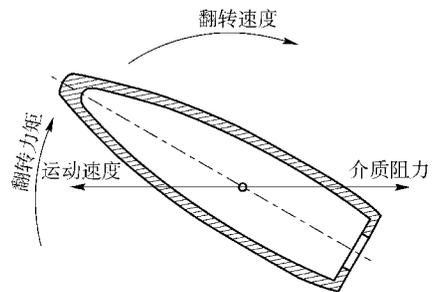


图 1 弹头侵彻软质目标的受力示意图

Fig. 1 The stress analysis of bullet penetrating a soft target

根据弹头在软质目标中的运动特点,在建立平面运动模型时,假设:

- 1) 弹头为刚体,忽略弹头变形与破碎;
- 2) 忽略弹头旋转(陀螺效应);
- 3) 弹头重力忽略;
- 4) 弹头运动发生在包含弹头轨迹的垂直平面内,平面外的偏航忽略;
- 5) 忽略科氏惯性力对弹头影响;

6) 目标为不可压缩粘性流体。

基于以上假设,将弹头在目标中的运动简化为在同一平面内有水平运动和绕质心的翻滚运动。弹头的运动方程为

$$\begin{cases} m\ddot{x} = -C_d \frac{\rho A_e}{2} \dot{x}^2, \\ I_b \ddot{\psi} = C_n \frac{\rho A_e l_b}{2} \dot{x}^2, \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_d 为弹头阻力系数; A_e 为有效浸润明胶面积; ρ 为介质密度; m 为弹头质量; C_n 为法向力系数; l_b 为弹头长度; I_b 为弹头赤道转动惯量; x 为弹头侵彻位移; ψ 为弹头翻滚角。

考虑到弹头的有效浸润明胶面积难以确定,并考虑到弹头偏角和弹头浸润面积的影响,设:

$$\begin{cases} C_d \frac{A_e}{A_{\max}} = C_d^* (1 + C_1 \sin^2 \psi), \\ C_n \frac{A_e l_b}{A_{\max} d} = C_n^* \sin \psi. \end{cases} \quad (2)$$

在计算弹头翻滚运动时,引入随翻滚角变化的阻力力矩系数 C_2 ,将(1)运动方程转换为

$$\begin{cases} \ddot{x} = -C_d^* \frac{\rho A_{\max}}{2m} (1 + C_1 \sin^2 \psi) \dot{x}^2, \\ \ddot{\psi} = C_n^* \frac{\rho A_{\max} d}{2I_b} \dot{x}^2 \sin \psi - C_2 \frac{\rho A_{\max} l_b^2}{2I_b} \dot{x} \dot{\psi}, \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_d^* 为小攻角时的阻力系数,为常量; C_n^* 为小攻角时的法向力系数,为常量; C_1 为跟长径比相关的系数; A_{\max} 为弹头的最大横截面积; d 为弹头直径。

采用该模型计算某步枪弹弹头速度在 950 m/s 侵彻机体目标的翻滚运动特性,如图 2 所示,其最大翻滚速度可达 18 000 rad/s。

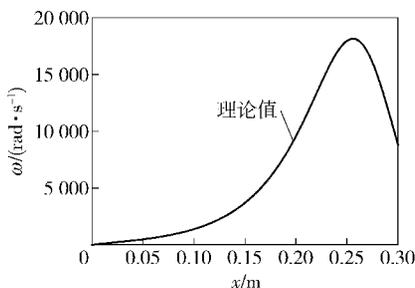


图 2 某步枪弹弹头在目标内的翻滚运动特性

Fig. 2 Rolling motion characteristics of a bullet in target

1.2 弹头破碎物理过程分析

根据上述弹头在机体的运动模型研究可知,弹

头在侵彻目标后,在翻滚力矩作用下其将绕质心旋转,假设其绕质心转动的角速度为 ω ,在不考虑其他作用力状态下,分析弹头以角速度 ω 绕质心翻滚时其内部的受力状态,如图 3 所示。

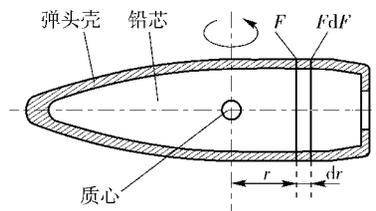


图 3 高速翻滚弹头的受力示意图

Fig. 3 The stress analysis of high speed rolling bullet

取距质心距离 r 处的微小截面积,其所产生的离心力为

$$\begin{cases} dF_l = -\rho_l \omega^2 A_l r dr, \\ dF_s = -\rho_s \omega^2 A_s r dr, \end{cases} \quad (4)$$

式中: F_l 为铅芯离心力; ρ_l 为铅芯密度; A_l 为铅芯截面积; F_s 为弹头壳离心力; ρ_s 为弹头壳密度; A_s 为弹头壳截面积; ω 为弹头翻滚角速度。

由于铅的强度极限较低,包裹在弹头壳内的铅芯在离心力作用下,除克服自身的材料强度外,会将剩余的作用力传递给弹头壳。所以当弹头壳所受的离心力大于其材料强度极限时弹头即产生破裂。

$$\sigma_s = \frac{F_s + F_l - \sigma_l A_l}{A_s}, \quad (5)$$

式中: σ_s 为弹头壳强度极限; σ_l 为铅芯强度极限。

各微元部分产生的离心力在质心位置叠加,通过(4)式可以看出弹头质心位置所受的离心拉力最大,将(4)式代入(5)式即可得出弹头壳所受离心力 σ_s 与翻滚角速度的关系,通过计算可知对于图 3 所示的步枪弹,当翻滚角速度大于 5 000 rad/s 时,弹头壳所受离心力超出了铜的强度极限 σ_s ,弹头壳将产生破裂。所以根据弹头侵彻目标的运动模型计算得出的弹头翻滚速度可知,其弹头翻滚产生的离心力是步枪弹弹头破碎的产生原因。

2 步枪弹翻滚破碎敏感因素数值仿真分析

造成弹头破碎的原因为弹头翻滚产生的离心力,即翻滚角速度越高,离心力越大,弹头越易破碎,所以弹头的翻滚状态是低侵彻步枪弹设计的重要参数。采用 LS-DYNA 动力仿真软件,仿真分

析不同结构特性弹头在软质目标(明胶靶标)中的翻滚状态,从而找出影响弹头破碎(翻滚位置及角速度)的主要因素。弹头材料选用 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、大应变率下的碰撞分析。明胶采用流体弹塑性 MATE_LASTIC_PLASTIC_HYDRO 材料模型。弹头与明胶间采用面面侵蚀接触算法。

仿真计算的弹头模型在外形和质量不变的情况下,将其内部结构分为 5 部分,如图 4 所示,通过调整各部分的材料密度来改变弹头的质量分布状态。具体结构及方案为:普通三件套结构,弹头的 2 和 4 部分、3 和 5 部分为同一种材料密度;单一结构,弹头的各部分均为同一种材料密度;外重中轻,弹头的 1、2、

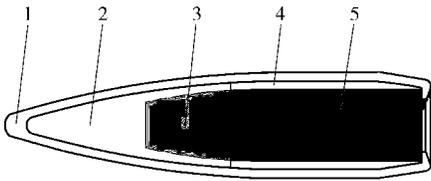


图 4 弹头模型结构图

Fig. 4 Structure model of bullet

表 1 不同结构特性弹头的翻滚状态仿真结果

Tab. 1 Rolling state simulation results of different structural bullets

方案	结构	速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	转动惯量比	转速/ ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)	质心位置/ mm	翻滚 90° 位置/ cm	平均翻滚角速度/ ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	普弹三件套	950	8.96	24 871	14.68	21	9 812
2	单一材料	950	8.86	24 871	14.87	21	10 753
3	外重中轻	950	7.93	24 871	14.99	21	10 064
4	前重后轻	950	9.53	24 871	13.05	21	4 486
5	后重前轻	950	7.70	24 871	16.11	17	16 186
6	普弹三件套	950	8.96	33 561	14.68	16	8 441
7	普弹三件套	600	8.96	15 708	14.68	18	8 220

4 部分较 3、5 部分材料密度大;前重后轻,弹头的 2、3 部分较 4、5 部分材料密度大;后重前轻,弹头的部分 4、5 较 2、3 部分材料密度大。仿真计算条件和结果如表 1 所示,其中方案 1、方案 4 和方案 5 弹头翻滚角随时间变化对比,如图 5 所示。

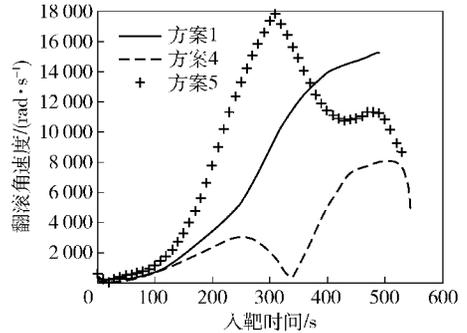


图 5 方案 1、方案 4 和方案 5 弹头翻滚运动仿真计算结果
Fig. 5 Rolling state simulation results of Schemes 1, 4 and 5

从表 1 和图 5 可以看出,弹头的质心位置对其翻滚运动状态影响较大,当弹头质心后移时弹头的翻滚速度会明显增加,弹头的翻滚位置也会提前,另外当弹头速度降低时弹头的翻滚速度也会下降,弹头的翻滚位置略靠后。

3 低侵彻步枪弹翻滚破碎过程的实验研究

3.1 低侵彻步枪弹方案设计

根据低侵彻杀伤步枪弹的使用要求,其方案设计在保证杀伤威力的同时,最大限度的减小侵彻深度。根据弹头破碎机制及影响因素分析的研究结论,可明确控制侵彻深度的主要途径有 3 种:1) 可通过提高弹头着速、弹头质心后移等方式提高弹头翻滚速度,增大离心力。2) 在保证弹头完整性的前

提下,减小弹头壳厚度、降低弹头壳强度,使弹头在目标内更易破碎。3) 采用合理结构实现弹芯的完全破碎,减小碎片的侵彻深度。

设计方案主要以方案 5 为基础进行优化设计,弹头初速为 950 m/s,弹头采用全被甲结构外形,外部为铜弹头壳,弹头壳内部包裹弹芯,弹芯由前部的轻质材料弹尖(铝或塑料)、后部的铅芯组成;质心位置距弹尖处 16 cm,在弹头圆柱部的弹头质心位置设置滚沟,如图 6 所示。

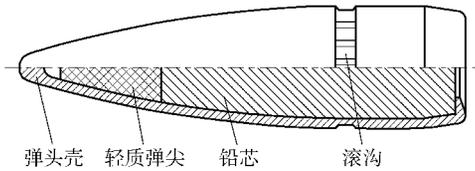


图 6 设计方案结构图

Fig. 6 Structure drawing of verification scheme

3.2 实验方案及设备

以往创伤弹道方面的研究认为^[9], 4 ℃、10% 浓度的明胶靶标能很好的模拟弹头对生物肌肉组织的侵彻杀伤效果, 二者的弹头侵彻深度及弹道特征基本一致。且明胶靶标有较好的透明度, 可直观的获得弹头的侵彻效果, 所以采用 4 ℃、10% 浓度的明胶靶标作为射击目标进行验证实验, 采用高速摄影记录弹头侵彻靶标的运动过程, 最后用直尺测得弹头最大侵彻深度及起始翻转位置。

具体实验布置如图 7 所示, 采用测速弹道枪发射枪弹, 射击距离 100 m, 明胶靶标尺寸为 35 cm × 25 cm × 25 cm, 采用高灵敏度光幕靶监测弹头初速, 高速摄影的型号为 phantomV710, 高速摄影帧频为 2×10^4 帧/s。

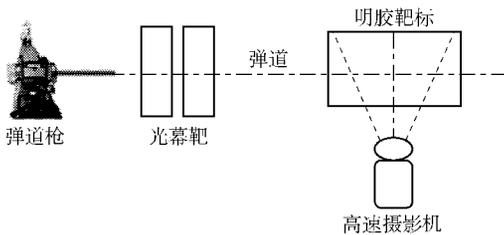


图 7 验证实验示意图

Fig. 7 Verification experiment sketch map

3.3 实验结果与分析

从高速摄影记录的弹头侵彻过程可以看出, 弹头撞击软质目标后, 迅速失稳翻滚, 其最大翻滚角速度可达到 2×10^4 rad/s 左右, 产生巨大的离心力。在离心力的作用下, 弹头会在应力最大处产生断裂 (滚沟处)。弹头被拉断后, 在冲击力和离心力的作用下弹头内部的铅芯会破碎, 轻质弹尖会脱离弹头壳; 断裂的弹头壳在冲击力的作用下会继续破碎变形。由于弹头的破碎使质量分散、阻力变大、能量释放加快, 很快停止运动。弹头侵彻运动过程达到了方案设计意图, 验证了理论分析及仿真计算所获得的结论, 侵彻过程如图 8 所示; 侵彻深度如图 9 所

示, 弹头破碎如图 10 所示。

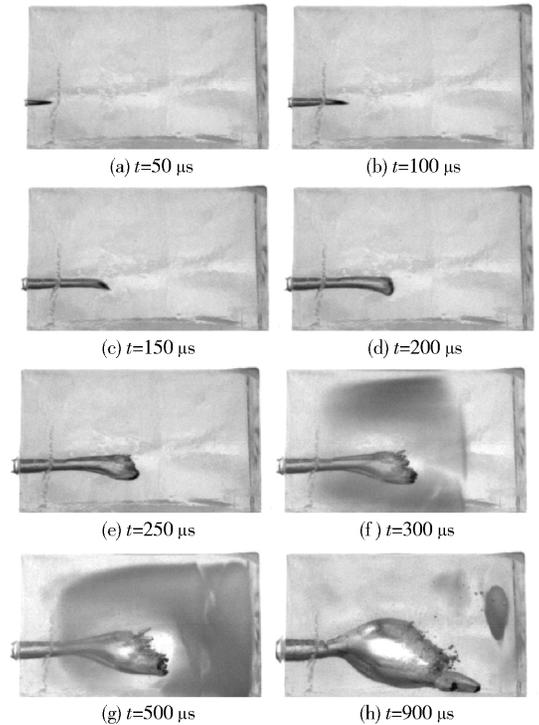


图 8 高速摄影实验结果

Fig. 8 High-speed-photographs of experimental results

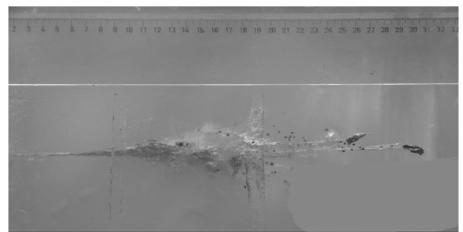


图 9 侵彻深度图

Fig. 9 Penetration depth



图 10 弹头破碎图

Fig. 10 The fragments of bullet

验证实验共射弹 6 发, 实验结果如表 2 所示, 其穿深在 30 ~ 35 cm 范围内, 比现有同口径制式步枪弹 (一般大于 60 cm) 降低了 1/2 左右, 其侵彻效果实现了方案的设计意图。根据美国 FBI 标准, 侵彻

10% 军用明胶,穿深不超过 35.5 cm,代表对人体不产生过穿透。另外,该方案弹头在目标中破碎分解,能量全部传递给目标,其杀伤作用大于同口径制式弹头。

表 2 验证方案侵彻性能实验数据

Tab.2 Penetrating test data sheet of verification schemes

序号	起始翻转位置/cm	侵彻深度/cm
1	9.0	31.5
2	8.5	35.0
3	10.0	35.0
4	9.0	31.5
5	9.0	32.0
6	10.0	33.5
平均值	9.0	33.0

4 结论

从理论分析、仿真计算及实验研究可以得出,高速步枪弹在侵彻明胶等软质目标时,弹头翻滚产生的离心力可使弹头产生破碎现象,且弹头质心位置是影响弹头翻滚状态的敏感因素,可采用调整质心位置的方法来控制弹头的翻滚状态,并结合提高弹头着速、减小弹头壳厚度、降低弹头壳强度等技术措施,能够将侵彻深度较制式结构步枪弹降低 1/2 左右,实现了低侵彻杀伤的作用效果。本文所揭示的步枪弹弹头翻滚破碎机理及提出的基于翻滚破碎机

理控制侵彻深度的技术措施,可有效指导低侵彻杀伤步枪弹的设计。

参考文献 (References)

- [1] Kneubuehl B P, Coupland R. Wound ballistics basics applications [M]. Berlin: Springer Medizin GmbH, 2008: 128.
- [2] Peters C E, Sebourg C L, Crowder H L. Wound ballistics of unstable projectiles. part i: projectile yaw growth and retardation [J]. Journal of Trauma and Acute Care Surgery, 1996, 40(3S): 10S - 15S.
- [3] Peters C E, Sebourg C L. Wound ballistics of unstable projectiles. part II: temporary cavity formation and tissue damage [J]. Journal of Trauma and Acute Care Surgery, 1996, 40(3S): 16S - 21S.
- [4] Sebourg C L, Peters C E. Flight dynamics of spin-stabilized projectiles and the relationship to wound ballistics [J]. Journal of Trauma and Acute Care Surgery, 1996, 40(3S): 22S - 26S.
- [5] Roecker E T, Ricchiazzi A J. Stability of penetrators in dense fluids [J]. Journal of Engineering Science, 1978, 16(11): 917 - 920.
- [6] 温焱珂, 徐诚, 陈爱军, 等. 步枪弹侵彻明胶靶标的数值模拟 [J]. 兵工学报, 2013, 34(1): 14 - 19.
WEN Yao-ke, XU Cheng, CHEN Ai-jun, et al. Numerical simulation of the penetration of bullet on gelatin target [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(1): 14 - 19. (in Chinese)
- [7] 刘荫秋, 王正国. 创伤弹道学 [M]. 北京: 人民军医出版社, 1993: 107 - 109.
LIU Yin-qiu, WANG Zheng-guo. Wound ballistics [M]. Beijing: People's Military Surgeon Publishing Company, 1993: 107 - 109. (in Chinese)