

doi: 10.7690/bgzdh.2022.05.013

## 狙击弹穿透玻璃后的偏转特性研究

康斌会<sup>1</sup>, 张国伟<sup>1,2</sup>, 巫志伟<sup>2</sup>, 白晶<sup>1</sup>, 李琼芳<sup>1</sup>

(1. 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2. 重庆嘉陵特种装备有限公司弹药技术中心, 重庆 400032)

**摘要:** 针对狙击手隔着玻璃准确击中目标的问题, 对狙击弹穿透玻璃的弹道进行数值模拟。以 7.62 mm 狙击子弹为研究对象, 运用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立有限元模型, 分析不同入射角下是否有攻角、转速对穿透玻璃后子弹偏转的影响, 得出不同组合下的影响规律。仿真结果表明: 入射角越大, 穿透玻璃后子弹偏转距离就越大; 有攻角时, 狙击弹穿透玻璃飞行距离越远, 偏转距离越大; 转速对穿障后子弹偏转距离的影响较小。

**关键词:** 狙击弹; 穿透; 玻璃; 弹道; 偏转

**中图分类号:** TJ411<sup>+</sup>.2 **文献标志码:** A

## Research on Deflection Characteristics of Sniper Bullet After Penetrating Glass

Kang Binhui<sup>1</sup>, Zhang Guowei<sup>1,2</sup>, Wu Zhiwei<sup>2</sup>, Bai Jing<sup>1</sup>, Li Qiongfang<sup>1</sup>

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

2. Ammunition Technology Center, Chongqing Jialing Special Equipment Co., Ltd., Chongqing 400032, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the sniper hits the target accurately through the glass, the trajectory of the sniper projectile penetrating the glass is simulated numerically. Taking the 7.62 mm sniper bullet as the research object, the finite element model was established by using ANSYS/LS-DYNA software. The influence of attack angle and rotation speed on the deflection of bullet after penetrating glass under different incident angles was analyzed, and the influence law under different combinations was obtained. The simulation results show that the larger the incident angle is, the greater the deflection distance of the bullet after penetrating the glass is; when there is an attack angle, the longer the flying distance of the sniper bullet after penetrating the glass is, the greater the deflection distance is; the rotation speed has little effect on the deflection distance of the bullet after penetrating a barrier.

**Keywords:** sniper projectile; penetration; glass; trajectory; deflection

### 0 引言

在发生劫持事件时, 歹徒往往会挟持人质躲藏在障碍物——玻璃的后面来避免被狙杀。这种情况下, 狙击手隔着玻璃可以看到歹徒挟持人质的场景, 能否一枪击毙歹徒成为一个非常重要的问题<sup>[1]</sup>。这种准确性问题的解决办法就是在靶场模拟各种绑架情况<sup>[2-3]</sup>进行试验, 总结规律为狙击手提供参考。考虑到挟持情景的复杂性、试验成本等问题, 可选用有限元数值模拟的方法解决这一问题。该方法不仅可以降低成本, 而且可以模拟挟持事件的多种情况, 实现快速提取各种数据<sup>[4]</sup>。笔者主要研究是否有攻角、转速对狙击弹穿透玻璃后子弹的偏转影响, 为狙击手准确射击提供依据。

### 1 仿真方案

根据文献[5]得知, 狙击子弹初速大约 800 m/s; 转速为 10 000 r/min。文献[6]提到要使枪弹在空气中稳定飞行, 攻角大约在 0°~2°, 本文中攻角取 2°。

另外根据文献[7]得知, 狙击手隔着玻璃进行射击时应尽可能选择小的入射角; 因此, 入射角  $\alpha$  取 0°~45°, 间隔取 9°。笔者主要研究子弹在无转速无攻角、有转速无攻角、无转速有攻角、有转速有攻角 4 种方案下穿透玻璃的弹道偏转情况。其中: 入射角是弹体轴线与玻璃靶板法线之间的夹角, 攻角是速度方向与弹体轴线方向的夹角, 总共建立 24 个弹道数值模型。

理想状态下子弹轨迹如图 1 所示,  $\delta$  为玻璃厚度。假设  $B$  点处是目标所在位置,  $C$  点处是软件 LS-DYNA 模拟出来的子弹实际落点, 实际中目标与玻璃间的垂直距离  $BF$  为  $L_i$  ( $i$  取值为 1, 2, 3, 4, 5, 6), 其中垂直距离 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 m 用  $L_1$ — $L_6$  表示; 理想状态下, 狙击手射击目标前透过钢化玻璃看到目标水平方向的距离  $BD$  为  $X_i$ ; 利用软件 LS-DYNA 模拟出来的子弹穿透玻璃飞行一定距离  $L_i$  时水平位移  $CD$  为  $X_{ii}$ ; 则狙击弹穿透玻璃后的偏转距离  $BC$  为  $\Delta X = X_i - X_{ii}$ 。

收稿日期: 2022-01-28; 修回日期: 2022-02-28

作者简介: 康斌会(1994—), 男, 甘肃人, 硕士, 从事弹药毁伤效能评估研究。E-mail: 1796703872@qq.com。

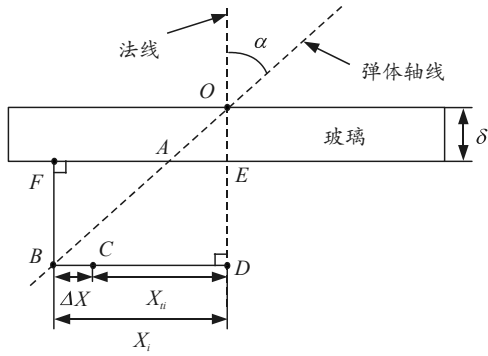


图 1 理想状态下子弹轨迹

## 2 数值模拟

### 2.1 有限元模型

建模采用的单位制为 g-cm-μs-Mbar，其中：质量单位为 g，长度单位为 cm，时间单位为 μs，应力的单位为 Mbar。通过查询相关手册<sup>[8]</sup>选用 7.62 mm 狙击弹，利用 TrueGrid 软件划分网格，狙击弹的有限元模型如图 2 所示。

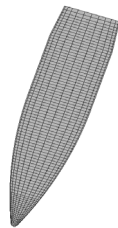


图 2 狙击弹有限元模型

查阅资料<sup>[9]</sup>得知，客车、大巴、公交车后风挡和侧窗玻璃均采用钢化玻璃，所以选取钢化玻璃。

表 1 子弹的材料参数

材料	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	G/Mbar	E/Mbar	PR	A	B	n	C	m
被甲	8.96	0.46	1.24	0.34	9.0E-4	0.002 92	0.310	0.025	1.09
铅芯	11.34	0.07			1.4E-4	1.76E-4	0.685	0.035	1.68

钢化玻璃密度  $2.53 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，剪切模量为 35.4 GPa，最大抗拉强度 150 MPa。由于玻璃属于脆性材料，所以选用 JH2 模型(\*MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CERAMICS)来描述，有利于呈现侵彻过程中的裂纹。

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*); \quad (2)$$

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*); \quad (3)$$

$$D = \sum \Delta \epsilon^p / \epsilon_f^p; \quad (4)$$

$$\epsilon_f^p = D_1(P^* + T^*)^{D_2}; \quad (5)$$

$$P = K_1 \mu + K_2 \mu + K_3 \mu. \quad (6)$$

该模型主要由 3 部分构成：第 1 部分用于描述钢化玻璃的强度，式(2)–(3)中 A、B、C、M、N 为

由于狙击弹尺寸与玻璃尺寸相差较大，这里玻璃尺寸选取  $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$ ，并在四周添加非反射边界。玻璃靶板的有限元模型如图 3 所示。子弹与玻璃均采用 SOLID164 单元，狙击弹共有 15 336 个实体单元，玻璃靶板共有 313 900 个实体单元。

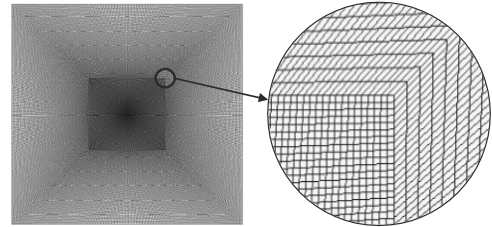


图 3 钢化玻璃有限元模型

### 2.2 材料模型及仿真算法

#### 2.2.1 材料模型

狙击弹由被甲和弹芯构成，其中被甲采用铜材质，弹芯采用铅材质。由于侵彻过程中狙击弹发生大变形，因此采用 \*JOHNSON\_COOK+\*EOS\_GRUNEISEN 来描述铅芯和子弹外壳。其中 \*JOHNSON\_COOK 的本构关系表达式为：

$$\sigma_y = (A + B \dot{\epsilon}^n) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^y) (1 - T^{*m}). \quad (1)$$

式中：A、B、C、n 和 m 为材料常数； $\dot{\epsilon}^y$  为无量纲塑性应变率； $\dot{\epsilon}^p$  为等效塑性应变； $T^*$  为相对温度， $T^* = (T - T_r) / (T - T_m)$ ，其中  $T_r$  为室温， $T_m$  为熔化温度。关于狙击弹的被甲和弹芯的部分材料参数<sup>[8-12]</sup>如表 1 所示。

材料常数，其数值分别为  $9.3\text{E}-6 \text{ MPa}$ 、 $5.0\text{E}-6 \text{ MPa}$ 、 $0.03$ 、 $1.0$ 、 $0.64$ ； $P^*$  为归一化压力， $P^* = P / P_{\text{HEL}}$ ； $T^*$  为归一化的最大拉伸静水压力， $T^* = T / P_{\text{HEL}}$ ， $T$  为玻璃的最大抗拉强度。第 2 部分用于描述侵彻过程中玻璃的损伤情况，式(4)–(5)中  $D_1$ 、 $D_2$  是塑性应变断裂参数，可以提高与失效不相邻表面材料的强度，查阅文献<sup>[13]</sup>得知  $D_1$ 、 $D_2$  分别为  $0.043$  和  $0.85$ ； $D$  为损伤因子，其中  $0 \leq D \leq 1$ 。第 3 部分用于描述玻璃的应力-应变曲线，式(6)中  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为常数，其数值分别为  $45.4$ 、 $-138$ 、 $290 \text{ GPa}$ ； $\mu$  是关于密度和体积的一个函数<sup>[14-16]</sup>。

#### 2.2.2 仿真算法

数值模型由子弹(被甲和弹芯)、玻璃、空气 3

部分组成，子弹、玻璃均采用拉格朗日算法，空气采用 ALE 算法。子弹被甲与弹芯之间采用面面自动接触算法，子弹与玻璃之间采用侵蚀面面接触算法，另外为避免接触面穿透引起负滑移能问题，滑移界面采用对称罚函数法进行控制。

### 3 结果分析

分析狙击弹以无转速无攻角、有转速无攻角、无转速有攻角、有转速有攻角 4 种情况穿透单层钢化玻璃后的偏转情况。另外，为方便描述，将穿透玻璃后狙击弹飞行距离（垂直距离）0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 m 用工况 1—6 表示。下面主要对狙击弹穿透玻璃后的偏转角度、偏转距离进行分析，为后续研究狙击弹穿透玻璃后偏转问题提供依据。

#### 3.1 偏转角度分析

图 4 是狙击弹在不同飞行距离下穿透玻璃后偏转角随入射角的变化曲线。

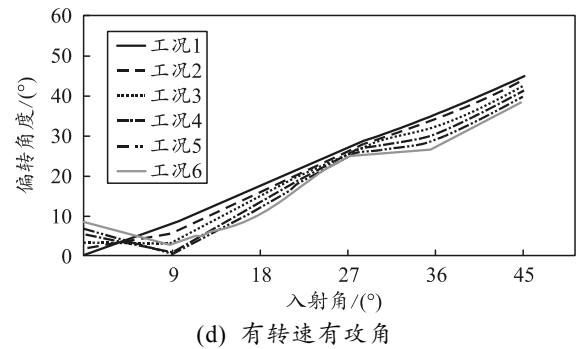
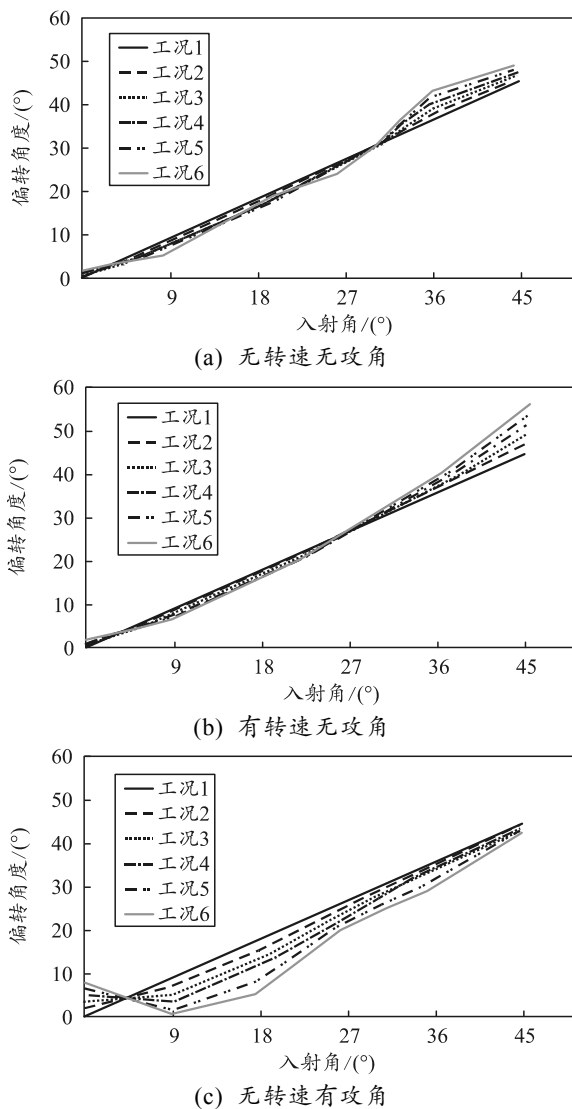
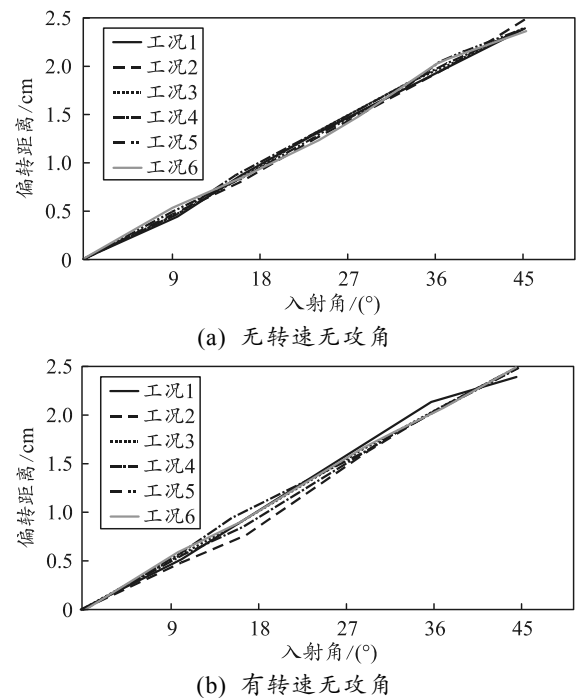


图 4 狙击弹在不同飞行距离下穿透玻璃后偏转角随入射角的变化曲线

由上图可以看出：随着入射角的增大，狙击弹穿障后的偏转角度都有所差异。在图 4(a)、(b)中，入射角在 0°~27°时，穿透玻璃后狙击弹飞行距离对偏转角几乎没有影响；入射角在 27°~45°时，随着狙击弹飞行距离的增加，穿透玻璃后子弹的偏转角也在增加，并且有转速时，增大的幅度比无转速时要大一些。但是在图 4(c)、(d)中，随着狙击弹飞行距离的增加，穿透玻璃后子弹的偏转距离反而在减小，并且减小的幅度也在逐渐减小。分析上图所有曲线发现：当狙击弹穿透玻璃后飞行距离在 0~0.5 m 之间，有攻角条件时，狙击弹穿透玻璃后飞行距离与偏转角度呈负相关，即偏转角度随着子弹穿透玻璃后飞行距离的增加而减小。

#### 3.2 偏转距离分析

图 5 是狙击弹在不同飞行距离下穿透玻璃后偏转距离随入射角的变化曲线。



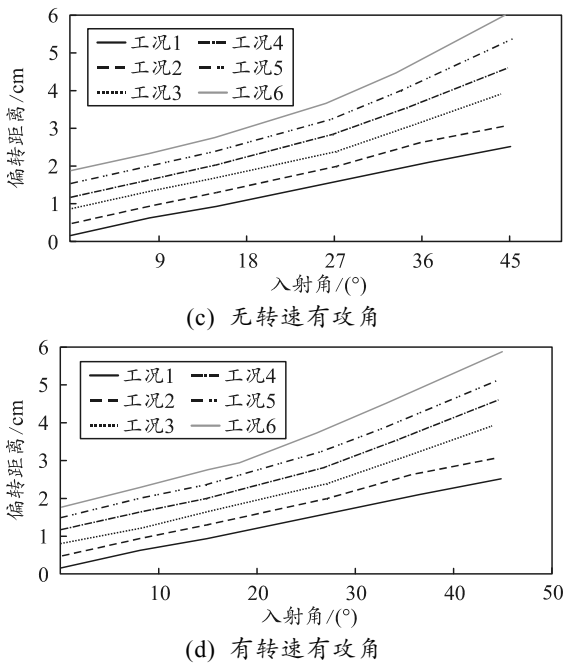


图 5 狙击弹在不同飞行距离下穿透玻璃后偏转距离随入射角的变化曲线

通过分析发现不同方案下的偏转距离有所差异。在图 5(a)、(b)中，有转速因素对穿障后子弹偏转距离影响不大；但是，偏转距离随着入射角的增大也在增大，即入射角与偏转距离呈正相关；当入射角为 45°时，偏转距离为 2.5 cm。另外，在分析图 5(c)、(d)时还发现：增加攻角因素后，偏转距离还与穿透玻璃后子弹飞行的距离有关，并且穿透玻璃后子弹飞行的距离越远，偏转距离就越大。在图 5(a)、(c)中，狙击弹刚穿透玻璃(狙击弹穿透玻璃后子弹飞行的距离为 0 m)时，是否有攻角对子弹偏转距离的影响不大；但在有攻角时，偏转距离随着穿透玻璃后的子弹飞行距离的增加而增大。当入射角为 45°时，偏转距离达到了 6.1 cm。同样分析图 5(c)、(d)时发现：转速对偏转距离的影响较小。综合分析认为狙击弹穿透玻璃后的偏转距离受入射角、攻角以及穿透玻璃后的飞行距离的影响较大，受转速的影响较小。

#### 4 结论

- 1) 当狙击弹穿透玻璃后飞行距离在 0~0.5 m，有攻角条件时，狙击弹穿透玻璃后飞行距离与偏转角度呈负相关，即偏转角度随着子弹穿透玻璃后飞行距离的增加而减小。
- 2) 无论是否有转速，当狙击弹穿透玻璃后飞行距离一定时，弹体偏转距离与入射角呈正相关。
- 3) 无攻角时，穿透玻璃后狙击弹飞行距离对偏

转距离的影响较小；有攻角且入射角一定时，穿透玻璃后狙击弹飞行距离越远，偏转距离就越大，越不利于狙击手击中目标。

#### 参考文献:

- [1] 李铁跌, 石仁, 马新和. 一起解救人质隔窗狙击事件的现场勘验[J]. 刑事技术, 2017, 42(1): 74-76.
- [2] THORNTON J I, CASHMAN P J C. The effect of tempered glass on bullet trajectory[J]. Journal of forensic sciences, 1986, 31(2): 743-746.
- [3] KINDER J D, LORY S, LAERE W V, et al. The deviation of bullets passing through window panes[J]. Forensic Science International, 2002, 125(1): 8-11.
- [4] 李松楠, 张国伟, 崔晓杰, 等. 小口径多功能弹破甲威力影响因素[J]. 兵工自动化, 2019, 38(4): 75-78.
- [5] 李金铭, 闫文敏, 董方栋, 等. 射击角对步枪弹侵彻玻璃靶后运动的影响规律[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(4): 349-355, 409.
- [6] 苑大威, 王雪皎, 李坤, 等. 某步枪弹侵彻明胶杀伤特性仿真研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(5): 43-46.
- [7] 马克·斯派塞. 狙击技术手册 狙击手训练、作战和武器[M]. 姚宗杰, 译. 北京: 中国市场出版社, 2018: 116-121.
- [8] 《枪弹手册》编写组. 枪弹手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 18-19.
- [9] 全国汽车标准化技术委员会. 汽车安全玻璃: GB9656—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [10] 温垚珂, 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.
- [11] PERONI L, SCAPIN M, FICHERA C, et al. Mechanical properties at high strain-rate of lead core and brass jacket of a NATO 7.62 mm ball bullet[J]. EPJ Web of Conferences, 2012, 26: 01060.
- [12] GIGLIO M, GILIOLI A, MANES A, et al. Investigation about the influence of the mechanical properties of lead core and brass jacket of a NATO 7.62 mm ball bullet in numerical simulations of ballistic impacts[J]. EPJ Web of Conferences, 2012, 26: 04010.
- [13] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, GRADY D E, et al. High strain rate properties and constitutive Modelling of glass[J]. Glass, 1995, 1: 1-15.
- [14] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, GERLACH C A. An improved computational constitutive model for glass[J]. Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences, 2017, 375(2085): 20160182.
- [15] JOHNSON H G R. A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures[J]. Journal of Applied Mechanics, 2011, 78(5): 051003.
- [16] 刘琥, 王玺, 项大林, 等. 防弹玻璃在子弹冲击下的数值模拟研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(5): 97-102.