

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0148

某 9 mm 手枪弹侵彻 MDF 的弹道特性*

刘子德¹, 王光华¹, 董方栋¹, 崔斌²

(1. 中国兵器工业第 208 研究所瞬态冲击技术重点实验室, 北京 102202;

2. 公安部物证鉴定中心, 北京 100038)

摘要: 为探究某 9 mm 手枪弹侵彻木质靶板的弹道特性, 以中密度板 (medium density fiberboard, MDF) 为研究对象进行了弹道侵彻试验, 通过减装药和角度可调节靶架获得了不同速度和弹着角下弹头的剩余速度和侵彻深度等关键信息; 通过 Poncelet 阻力模型对试验结果进行了分析, 并得出侵彻深度与侵彻速度之间的关系式; 建立了手枪弹侵彻 MDF 的数值计算模型, 对不同速度和不同弹着角的弹头偏转行为进行了研究, 并得到了临界跳飞角度与着靶速度之间的函数关系。结果表明, 弹头正侵彻 25 mm 厚度的 MDF 时, 能量损失量与入射速度具有线性相关性; 弹头侵入 MDF 时均会产生负方向偏转, 弹头速度降低或者弹着角减小均会使负方向偏转角度增大, 当弹头低速穿透 MDF 或者弹着角小于 45° 时, 弹头侵彻 MDF 过程中会产生较大角度偏转, 在射出 MDF 时出现弹道转正现象。

关键词: 中密度板; 手枪弹; 弹道特性; 侵彻; 偏转

中图分类号: O385

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Ballistic characteristics of a 9 mm pistol bullet penetrating medium density fiberboard

LIU Zide¹, WANG Guanghua¹, DONG Fangdong¹, CUI Bin²

(1. *Science and Technology on Transient Impact Laboratory, No.208 Institute of China Ordnance*

Industries, Beijing 102202, China;

2. *Physical Evidence Evaluation Center of the Ministry of Public Security, Beijing 100038, China)*

Abstract: In order to explore the ballistic characteristics of a 9 mm pistol bullet penetrating wooden target board, a ballistic penetration experiment was carried out by choosing medium density fiberboard (MDF) as the research object. Key information such as the residual velocity and depth of penetration to the bullet at different velocities and impact angles was obtained by reducing the charge and adjusting the angle adjustable target frame. The experiment results were analyzed by the Poncelet resistance model, and the relationship between depth of penetration and penetration velocity was obtained. The numerical calculation model of the pistol bullet penetrating the MDF was established. The model studied the deflection behavior of bullet with different velocity and different impact angles, and the functional relationship between the critical ricochet angle and the target velocity was obtained. The results show that when the bullet penetrates the MDF with the thickness of 25 mm, the energy loss is linearly related to the incident velocity; when the bullet penetrates the MDF, it will deflect in the negative direction, and the reduction of the bullet velocity or the reduction of the impact angle will increase the deflection angle in the negative direction. When the bullet penetrates the MDF at a low velocity or the impact angle is less than 45°, the bullet shows a large deflection angle. When the bullet shoots out of the MDF, the trajectory turns positive.

Keywords: medium density fiberboard; pistol bullet; ballistic characteristic; penetrate; deflect

* 收稿日期: 2020-05-14; 修回日期: 2020-06-11

基金项目: 痕迹科学与技术公安部重点实验室基金(2018FMKFKT06)

第一作者: 刘子德(1994—), 男, 硕士, 助理工程师, 809189782@qq.com

通信作者: 王光华(1965—), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, wangguanghua@sina.com

在持枪作案、恐怖袭击等案件或事故的调查中,经常需要对现场进行弹道重建^[1-2]。而木材是城市中家具制作和建筑结构中的常用材料,弹丸对木材的冲击试验是弹道重建研究中的一种重要技术手段,试验中靶板上留存的弹坑深度或弹头穿透靶板的能量损耗可以对射击位置和射击角度的判定提供依据^[3-4]。科研工作者针对装甲毁伤以及防护工作进行过大量的弹丸或破片高速冲击试验^[5-8],木质靶板在侵彻试验中应用较少。木制材料中 25 mm 厚松木靶曾被看作人员模拟靶^[9];法医和刑侦人员针对弹道重建进行过一些其他木质材料的侵彻试验,通过记录子弹轨迹,可以使研究人员更好地理解所发生事件的性质和顺序。当前的研究主要集中在临界跳弹角和跳弹或穿孔后弹头的偏斜^[10-12]。其中, Kerkhoff 等^[10]采用 2 种口径的手枪弹对 4 种不同密度的木材进行过弹道侵彻试验,研究发现,弹头发生跳弹的临界角度与弹头口径和木材特性相关,并且弹头发生跳弹的临界角度与木材的密度和硬度存在极强的线性关系; Mattijssen 等^[13]对石膏板、中密度板和金属板进行了不同角度的侵彻试验,提出根据靶板厚度以及材料特性应选用合适的测量方法,以减小系统误差,提高测量的准确度和精确度,其中探针法、椭圆法和带入法三种测量方法最为常见。考虑到木材中,中密度板(medium density fiberboard, MDF)是一种廉价的建筑材料,广泛应用于家具、橱柜和其他室内建筑。因此,开展手枪弹侵彻 MDF 的弹道特性研究可以为涉枪案件的快速侦破提供数据支撑。

本文中以 MDF 为研究对象,通过开展不同速度、不同弹着角手枪弹侵彻 MDF 的试验,获得弹头侵彻 MDF 的深度、弹头入射速度和出射速度等关键信息,并对试验结果进行分析,建立弹头侵彻密度板的数值仿真模型,进一步分析弹头侵入 MDF 后的弹道特性。

1 试验

1.1 试验装置及方法

试验装置由 9 mm 弹道枪、不同装药量的 9 mm 手枪弹、厚度为 25 mm 的 MDF 和靶架(靶架角度可调节)组成,其中弹头质量为 8 g。试验中通过光幕靶和高速摄影分别获得弹头的入射速度(v_1)和出射速度(v_2)。试验时靶板距离枪口 10 m,手枪弹射击距离较短时(9~18 m),弹道轨迹可看作是一条直线,出枪口到 MDF 的距离始终相等,因此每发试验弹着点具有一致性。

1.2 试验数据

表 1 为手枪弹侵彻 MDF 试验的有效数据,表中: θ 为着靶角度, P_1 为靶板厚度方向上弹头侵彻密度板的深度, ΔE 为弹头贯穿或者嵌入 MDF 状态时弹头损失的能量。

表 1 弹头侵彻中密度纤维板的试验数据

Table 1 Tested data of bullet penetrating medium density fiberboard

试验	$\theta/(^\circ)$	$v_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_2/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	P_1/mm	$\Delta E/\text{J}$	试验编号	$\theta/(^\circ)$	$v_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_2/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	P_1/mm	$\Delta E/\text{J}$
1	90	395	343	25.00	153.5	11	90	56	0	3.57	12.5
2	90	250	189	25.00	107.1	12	90	43	0	2.42	7.5
3	90	221	154	25.00	100.5	13	60	385	331	25.00	153.5
4	90	212	143	25.00	98.0	14	60	214	151	25.00	92.0
5	90	177	95	25.00	89.0	15	45	384	322	25.00	175.1
6	90	170	94	25.00	80.3	16	45	205	122	25.00	108.6
7	90	132	19	25.00	68.3	17	30	372	283	25.00	233.2
8	90	111	0	13.80	49.3	18	30	245	121	25.00	60.1
9	90	95	0	10.80	36.1	19	30	201	0	9.72	0
10	90	92	0	9.34	34.1	20	30	86	0	0	0

由表 1 可知,弹头正侵彻厚度为 25 mm 的 MDF 时,穿透状态下,弹头的剩余速度和能量损失量与入射速度均为正相关性;弹头嵌入中密度板时,嵌入深度与入射速度为正相关性。其中入射速度为 111、

95、92 m/s 时, P_1 分别为 13.8、10.8、9.34 mm; 入射速度为 56 m/s 和 43 m/s 时, 密度板表面分别留存 3.57 mm 和 2.42 mm 深度的弹坑。

试验 7 中, 弹头穿透 MDF 后剩余速度为 19 m/s, 共损失了 68.3 J 能量, 弹头剩余能量为 1.44 J。试验 8 中, 弹头穿深为 13.8 mm, 能量损失为 49.3 J。这表明, 弹头正侵彻 25 mm 厚 MDF 时极限穿透速度介于 111 m/s 和 132 m/s 之间, 并且更靠近 132 m/s。试验 19 中, 弹头最大侵彻深度为 9.72 mm, 弹头在密度板表层滑移一段距离后, 最终产生跳弹现象。试验 20 中, 直接产生跳弹现象, 密度板表面存在轻微擦痕。这表明, 弹头速度降低和着靶角度减小均会引起跳弹现象, 弹头着靶角度减小相比速度降低致使跳弹现象发生的概率更大。

部分 MDF 受损伤区域如图 1 所示: 图 1(a) 中, 弹头高速穿透 MDF, MDF 背面出现脱落, 损伤区域呈圆形, 但损伤面积较小; 图 1(b) 中, MDF 背面出现较大区域的隆起和部分脱落的现象, 这是由于弹头穿深较大或者刚刚穿透 MDF 时, MDF 上出射面弹孔区域承受拉伸作用; 图 1(c) 中, 弹头嵌入 MDF 的深度为 9.34 mm, MDF 背面未见损伤。

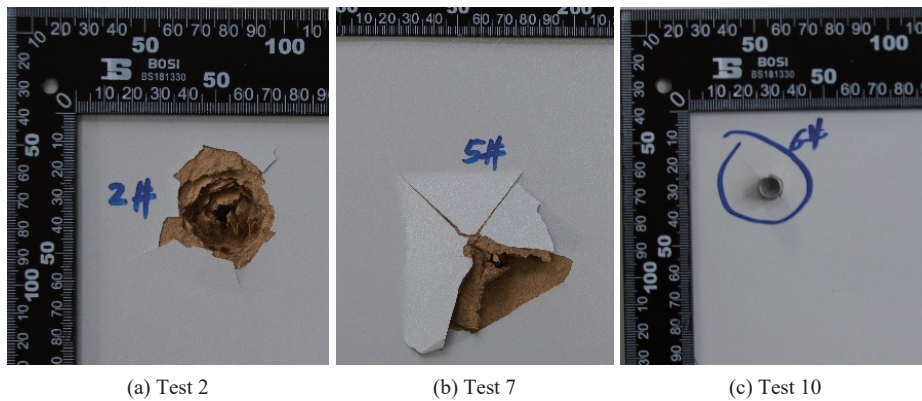


图 1 密度板损伤区域

Fig. 1 Damage area in medium density fiberboard

弹头正侵彻且穿透 MDF 时剩余速度与入射速度拟合曲线和弹头能量损失量与入射速度拟合曲线分别如图 2 和图 3 所示。

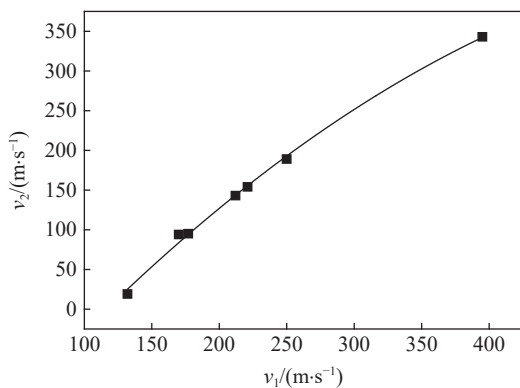


图 2 剩余速度随入射速度的变化

Fig. 2 Residual velocity varied with incident velocity

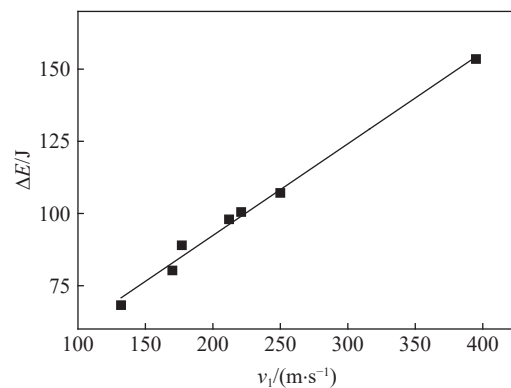


图 3 能量损耗量随入射速度变化

Fig. 3 Energy loss varied with incident velocity

由图 2 可知, 弹头的速度不高于 250 m/s 时, 速度降接近常数; 弹头速度为 395 m/s 时, 弹头的速度降减小。由图 3 可知, 弹头正侵彻且穿透 25 mm 厚 MDF 的情况下, 能量消耗量与入射速度表现出线性相

关性。经由 Origin 软件拟合得出, 弹头穿透密度板的情况下, 能量损失量与入射速度之间经验公式为:

$$\Delta E = 0.3175v_1 + 28.893 \quad (1)$$

式中: ΔE 为弹头损失的能量, J; v_1 为入射速度, m/s。

侵彻力学中, Poncelet 阻力模型^[14]应用较广泛, 其中侵彻阻力主要基于牛顿第二定律, 弹头侵彻木板过程中的侵彻阻力公式为:

$$m \frac{dv}{dt} = F = -\beta - \alpha v^2 \quad (2)$$

式中: m 为弹头质量, v 为特定时刻 t 的瞬时速度; F 为 t 时刻的侵彻阻力, β 为靶板材料的强度参数, α 为靶板的惯性应力。

由式(2)可推导出弹头侵彻木靶的侵彻深度 (P) 与弹头的着靶速度 v_0 和特定时刻 t 的速度 v 之间的关系式为:

$$P = \frac{m}{2\alpha} \ln \left(\frac{\beta + \alpha v_0^2}{\beta + \alpha v^2} \right) \quad (3)$$

当 $\alpha=0$ 时, 模型称作 Robins-Euler 模型, P 与 v_0 之间的关系式为:

$$P = \frac{mv_0^2}{2\beta} \quad (4)$$

在此模型中, 弹头的速度降为常数。根据试验中弹头侵彻 MDF 的嵌入深度可求得: $\alpha=0.012 \text{ kg/m}$, $\beta=3\,342 \text{ kg}\cdot\text{m/s}^2$ 。因此, 弹头侵彻 MDF 时, $P(\text{m})$ 与弹头侵彻速度之间的关系式为:

$$P = \frac{1}{3} \ln \left(\frac{3\,342 + 0.012v_0^2}{3\,342 + 0.012v^2} \right) \quad (5)$$

根据侵彻阻力公式, 弹头的速度较低时, 靶板的强度项参数 β 占主要优势, 这时的惯性项参数往往可以忽略; 当弹头的速度较高时, 弹头的惯性项参数 αv^2 占主导地位。因此, 当弹头最终嵌入密度板时, 根据式(4)可知, 弹头的能量损耗量与嵌入深度呈线性关系; 且弹头低速穿透 MDF 时, 弹头的速度降为常数。随着弹头速度增大, 弹头的惯性项参数相比密度板的强度项参数不可忽略时, 弹头的速度将减小。

2 弹头侵彻 MDF 的数值模拟

2.1 数值模型与材料参数

选用 LS-DYNA 有限元软件开展数值模拟。使用 Truegrid 参数化建模构造弹头侵彻 MDF 的物理模型。调整参数化中网格的参数即可获得不同状态的物理模型。网格化的物理模型如图 4 所示。

弹头由钢芯、铅套、头壳组成, 质量为 8 g。MDF 与弹头相比刚度较低, 侵彻 MDF 过程中弹头不会发生变形。因此, 数值模型中将弹头各部分视作刚体, 材料模型选用 *MAT_RIGID 来表征。MDF 呈交叉错落结构, 结构均匀, 各部方向性能基本相同, 因此将 MDF 视作弹性体, 材料模型选用 *MAT_ELASTIC 来表征。弹头各个结构以及 MDF 的材料参数如表 2 所示^[15-17], 且 MDF 最大失效力为 0.1 GPa。

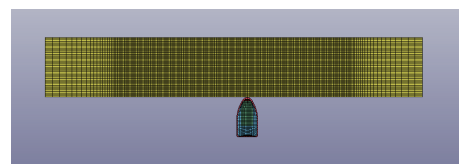


图 4 网格化后的物理模型

Fig. 4 The physical model after meshing

表 2 弹头以及中密度板的材料参数

Table 2 Material parameters for bullet and medium density fiberboard

结构	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
弹头壳	7920	90	0.35
铅套	11340	17	0.42
钢芯	7800	201	0.30
中密度板	716.7	0.24	0.31

2.2 仿真判据

表 3 为弹头侵彻 25 mm 厚 MDF 时的部分试验与数值计算结果, 表中 v_3 为数值模拟中的剩余速度。

表 3 剩余速度试验与数值模拟结果

Table 3 Tested and numerically simulated residual velocities

$\theta/(\circ)$	$v_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_2/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_3/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	v_2/v_1	v_3/v_1	误差/%
30	245	121	123	0.49	0.50	1.6
45	205	122	137	0.60	0.66	12.3
60	214	151	163	0.70	0.76	7.9

由表 3 可知, 数值模拟所得剩余速度相比试验所得剩余速度略高。剩余速度的误差在 15% 以内。当弹着角为 30° 时, 剩余速度的试验值与数值模拟结果之间的误差最小。弹着角为 30° , 试验中弹头入射孔和出射孔在密度板平面上的水平距离为 80 mm, 数值模拟中偏转的水平距离为 82.6 mm。弹道轨迹如图 5 所示。

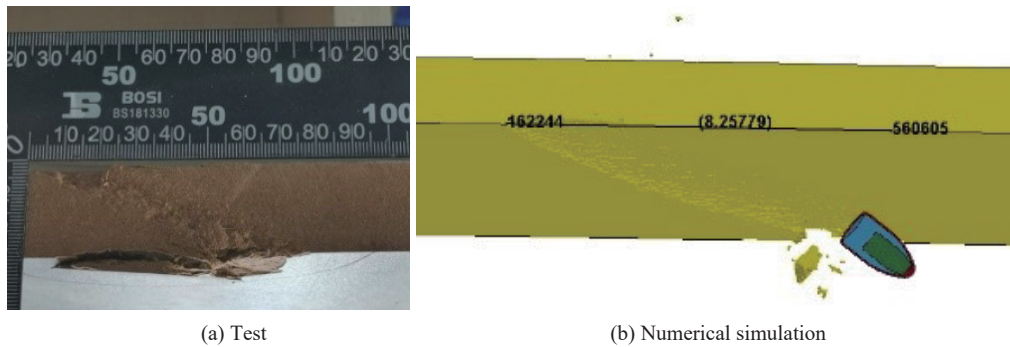


图 5 试验和数值模拟的弹道轨迹

Fig. 5 Tested and numerically simulated ballistic trajectories

2.3 入射速度变化对侵彻过程的影响

弹着角为 30° , 入射速度分别选定为 380、350、300、250 m/s。弹头偏转角度 φ 随时间的变化曲线如图 6 所示。

由图 6 可知, 弹头开始侵入 MDF 时, 均会向着靶角度减小的方向(负方向)偏转。这是由于弹头开始侵入 MDF 时, 向负方向偏转所受的阻力相比原弹道方向阻力小。随着侵彻深度的增大, 弹头向射出中密度板表面的方向偏转相比沿原来侵彻方向所受的侵彻阻力小, 此时偏转角度向正方向增大。

弹头侵入中密度板后的负方向偏转角度与着靶的速度呈负相关性。弹头速度为 300、350、380 m/s 时, 弹头射出中密度板时偏转角度小于 2° 。弹头速度为 250 m/s 时, 弹头首先向负方向偏转 16.8° , 射出中密度板时向正方向偏转 6.8° , 弹头在中密度板内发生了大角度偏转。这表明, 弹头高速穿透中密度板的过程中偏转角度始终较小; 弹头低速穿透中密度板时, 在侵彻过程中会发生大角度偏转。

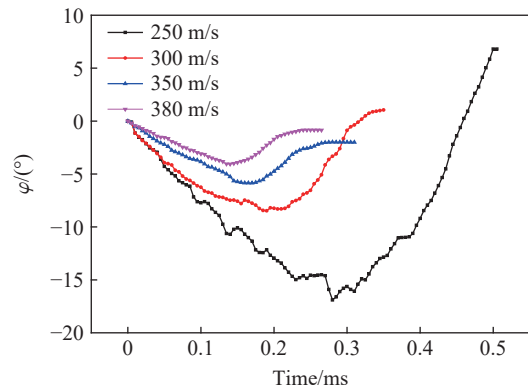


图 6 不同入射速度时偏转角随时间的变化

Fig. 6 Change of deflection angle with time at different incident velocities

2.4 弹着角变化对侵彻过程的影响

入射速度为 300 m/s, 弹着角分别为 30°、45°、60°、75°和 90°, 弹头的剩余速度随弹着角的变化曲线如图 7 所示, 且弹头侵彻 MDF 过程中弹头偏转角度随时间的变化曲线如图 8 所示。

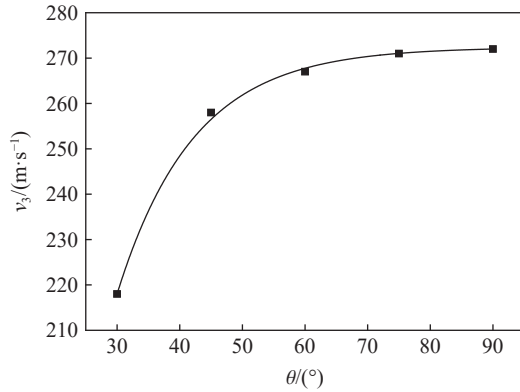


图 7 入射速度为 300 m/s 时, 剩余速度随着靶角的变化

Fig. 7 Change of residual velocity with landing angle at the incident velocity of 300 m/s

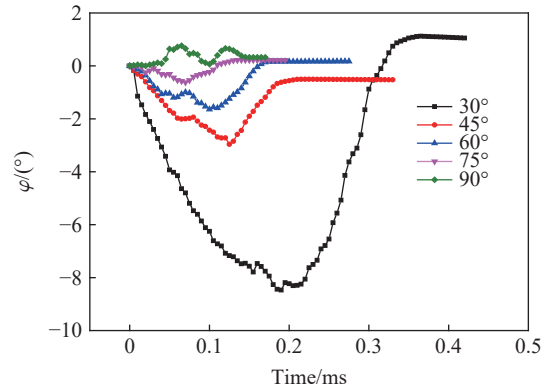


图 8 入射速度为 300 m/s, 不同弹着角时偏转角度随时间变化曲线

Fig. 8 Change of deflection angle with time at different landing angles in the case of the same incident velocity 300 m/s

由图 7 可知, 入射速度相同时, 剩余速度随着靶角度减小而降低, 而弹头速度降逐渐增大。当弹着角在 75°~90°之间时, 剩余速度变化较小。弹着角在 30°~45°时, 剩余速度变化最显著。剩余速度随着靶角度变化的曲线整体呈开口向下的半抛物线形状。入射速度为 300 m/s 时, 弹头剩余速度 v_3 与着靶角度 θ 之间的关系式为:

$$v_3 = 272.39 - 212.07(e^{-\theta/10.9789} + e^{-\theta/12.19} + e^{-\theta/13.418}) \quad (6)$$

由图 8 可知, 弹头正侵彻时, 弹头侵入 MDF 过程中发生小角度偏转, 射出 MDF 时偏转角度 ϕ 为 0°。弹头侵彻过程中负方向偏转角度与弹着角呈负相关性。着靶角度不小于 45°时, 弹头负方向最大偏转角度为 3°, 弹着角为 30°时, 弹头向负方向偏转最大角度为 8.5°。5 种工况下弹头射出 MDF 时, 射出角度均接近原初始着靶角度。这表明, 当弹着角小于 45°时, 弹头侵彻 MDF 过程中易发生偏转。

当弹头偏转角度较大时, 弹头容易产生跳弹现象。通过数值模型计算了弹头入射速度为 370、300、250、200、150 m/s 时发生跳弹的最大弹着角分别为 14°、19°、24°、30°、39°。经过 Origin 软件拟合可得临界跳弹的着靶角度 θ 与着靶的速度 v_0 之间的关系式为:

$$\theta = 81.7 \exp\left(\frac{-v_0}{175}\right) + 4.2 \quad 14^\circ \leq \theta \leq 39^\circ \quad (7)$$

由此可得, 此 9 mm 弹头侵彻 25 mm 厚 MDF 的临界跳弹角为 14°。

3 结 论

通过试验和数值模拟研究了某 9 mm 手枪弹侵彻中密度板 (medium density fiberboard, MDF) 的弹道特性, 得到如下结论。

(1) 弹头侵彻 25 mm 厚的 MDF 的过程中, 侵彻深度 (P , m) 与着靶速度 (v_0 , m/s) 和剩余速度 (v , m/s) 之间的关系式为: $P = \frac{1}{3} \ln\left(\frac{3342 + 0.012v_0^2}{3342 + 0.012v^2}\right)$; 弹头穿透密度板的情况下, 能量损失量 (ΔE , J) 与入射速度 (v_1 , m/s) 之间经验公式为: $\Delta E = 0.3175v_1 + 28.893$ 。

(2) 弹着角在 14°~39°时临界跳弹着靶角度 (θ , °) 与入射速度 (v_0 , m/s) 的关系式为: $\theta = 81.7 \exp\left(\frac{-v_0}{175}\right) + 4.2$ 。此 9 mm 弹头以 370 m/s 的速度侵彻 25 mm 厚的 MDF 时, 临界跳弹角为 14°。

(3) 弹头侵入 MDF 时, 均会产生向负方向偏转现象; 入射速度降低和弹着角减小均会使负方向偏转角增大, 弹着角小于 45° 时, 弹头侵彻 MDF 过程中更易发生偏转; 弹头射出 MDF 时出现弹道转正现象。

参考文献:

- [1] MATTIJSSEN E J A T, PATER K D H, STOEL R D. Ricochet behavior on glass-critical ricochet angles, ricochet angles, and deflection angles [J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2016, 61(6): 1456–1460. DOI: 10.1111/1556-4029.13201.
- [2] HU S L, SHEN H, WANG S C, et al. Trajectory reconstruction through analysis of trace evidence in bullet-intermediate target interaction by SEM/EDX [J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2009, 54(6): 1349–1352. DOI: 10.1111/j.1556-4029.2009.01158.x.
- [3] WALTERS M, LISCIO E. The accuracy and repeatability of reconstructing single bullet impacts using the 2D ellipse method [J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2020, 65(4): 1120–1127. DOI: 10.1111/1556-4029.14309.
- [4] LISCIO E, LE Q, GURYN H. Accuracy and reproducibility of bullet trajectories in FARO zone 3D [J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2020, 65(1): 214–220. DOI: 10.1111/1556-4029.14144.
- [5] 唐奎, 王金相, 陈兴旺, 等. 夹心弹对半无限钢靶的侵彻特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(5): 053302. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0323.
TANG K, WANG J X, CHEN X W, et al. Penetration characteristics of jacketed rods into semi-infinite steel targets [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(5): 053302. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0323.
- [6] 张元豪, 程忠庆, 侯海量, 等. 结构间隙对夹芯式复合装甲结构抗侵彻性能的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(12): 125104. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0270.
ZHANG Y H, CHENG Z Q, HOU H L, et al. Influence of structural interspace on anti-penetration performance of sandwich composite armor system [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(12): 125104. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0270.
- [7] 包阔, 张先锋, 谈梦婷, 等. 子弹撞击碳化硼陶瓷复合靶试验与数值模拟研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(12): 123102. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0462.
BAO K, ZHANG X F, TAN M T, et al. Ballistic test and numerical simulation on penetration of a boron-carbide-ceramic composite target by a bullet [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(12): 123102. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0462.
- [8] 周捷, 智小琦, 徐锦波, 等. 小尺寸破片对单兵防护装备的侵彻研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(2): 023304. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0023.
ZHOU J, ZHI X Q, XU J B, et al. Research on penetration of small size fragment to single soldier protection equipment [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(2): 023304. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0023.
- [9] 贺琪. 中小口径枪弹侵彻威力模型研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [10] KERKHOFF W, ALBERINK I, MATTIJSSEN E J A T. An empirical study on the relation between the critical angle for bullet ricochet and the properties of wood [J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2015, 60(3): 605–610. DOI: 10.1111/1556-4029.12738.
- [11] MATTIJSSEN E J A T, KERKHOFF W, BESTEBREURTJE M E. Bullet trajectory after impact on laminated particle board [J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2018, 63(5): 1374–1382. DOI: 10.1111/1556-4029.13717.
- [12] KERKHOFF W, ALBERINK I, VAN DER HAM K C J M, et al. Influence of muzzle instability on bullet deflection after perforating laminated particleboards [J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2020, 65(1): 221–224. DOI: 10.1111/1556-4029.14171.
- [13] MATTIJSSEN E J A T, KERKHOFF W. Bullet trajectory reconstruction-methods, accuracy and precision [J]. *Forensic Science International*, 2016, 262: 204–211. DOI: 10.1016/j.forsciint.2016.03.039.
- [14] KOENE L, BROEKHUIS F R. Bullet penetration into wooden targets[C]//International Symposium on Ballistic, 2017.
- [15] 韩瑞国, 金永喜, 卢海涛, 等. 步枪弹对带软硬复合防护明胶靶标的侵彻机制研究 [J]. *兵工学报*, 2019, 40(10): 1995–2004. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.10.004.
HAN R G, JIN Y X, LU H T, et al. Investigation into the penetrating mechanism of rifle bullet against the gelatin target with soft/hard composite armor [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(10): 1995–2004. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.10.004.
- [16] HUNT J F, ZHANG H J, GUO Z R, et al. Cantilever beam static and dynamic response comparison with mid-point bending for thin MDF composite panels [J]. *BioResources*, 2013, 8(1): 115–129. DOI: 10.15376/biores.8.1.115-129.
- [17] ZHANG H J, HUNT J F, ZHOU L J. Comparison of wood composite properties using cantilever-beam bending [J]. *BioResources*, 2015, 10(2): 3070–3078. DOI: 10.15376/biores.10.2.3070-3078.

(责任编辑 张凌云)