

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0309

钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶的研究*

唐昌州¹, 智小琦¹, 高峰², 于永利³

1. 中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051;
2. 内蒙古北方重工业集团有限公司, 内蒙古 包头 014033;
3. 吉林江机特种工业有限公司, 吉林 吉林 132021)

摘要: 为研究钨球对防弹衣加人体等效靶的侵彻性能, 利用 12.7 mm 弹道枪对钨球侵彻三级软体防弹衣加 25 mm 厚红松靶开展了实验研究; 在此基础上, 利用 LS-DYNA3D 软件对侵彻过程及破坏机理进行了分析, 并研究了钨球质量变化对弹道极限及靶板能量吸收的影响; 依据量纲分析建立了钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶的穿靶能量公式, 推导了钨球的弹道极限公式。研究结果表明: 0.17、0.21、0.44 g 的小钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶的弹道极限分别为 742.3、692.9、570.1 m/s; 侵彻过程中, 防弹衣以基体开裂、纤维断裂和拉伸分层破坏为主, 纤维层面内出现类似“十”字型的损伤, 松木靶以剪切和冲塞剥落破坏为主; 随着钨球质量的增加, 弹道极限呈幂函数形式降低, 靶板的能量吸收率逐渐降低; 钨球穿靶能量公式及弹道极限公式的计算结果与实验结果吻合良好, 可分别用于计算不同侵彻速度下的穿靶能量和不同质量钨球的弹道极限。

关键词: 钨球; 防弹衣; 红松靶; 弹道极限; 数值模拟; 量纲分析

中图分类号: O385 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

Investigation on tungsten spheres penetrating into pine target covered with body armor

TANG Changzhou¹, ZHI Xiaoqi¹, GAO Feng², YU Yongli³

1. College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;
2. Inner Mongolia North Heavy Industries Group Co. Ltd., Baotou 014033, Inner Mongolia, China;
3. Jilin Jiangji Special Industries Co. Ltd., Jilin 132021, Jilin, China)

Abstract: It is one of the future development directions to use small tungsten alloy spherical fragments in individual warhead. In order to investigation the penetration performance of small tungsten spheres against human simulation target covered with body armor, taking a 25 mm thick pine target of common international standards as the human simulation target, the experiment of small tungsten spheres penetrating into 25 mm thick pine target covered with third level body armor was carried out by a 12.7 mm ballistic gun. On this basis, the experiment was simulated by LS-DYNA3D software where the penetration process and failure mechanism were analyzed, and the influence of the mass change of tungsten spheres on energy absorption of target and ballistic limit were studied. According to dimensional analysis, energy formula of tungsten spheres penetrating into pine target covered with body armor was established, and the ballistic limit formula of tungsten spheres was deduced. The investigation results show that the ballistic limits of small tungsten spheres with the mass of 0.17, 0.21 and 0.44 g penetrating into the pine target covered with body armor are 742.3, 692.9 and 570.1 m/s, respectively. In the process of penetration, matrix crack, fiber breakage and tensile delamination are the main failure modes of body armor, and the damage similar to the "cross" shape appears on the fiber layer. However, the failure modes of pine target are mainly shear and plug spalling. The ballistic

* 收稿日期: 2020-08-31; 修回日期: 2020-12-24

第一作者: 唐昌州(1996—), 男, 硕士研究生, 562870134@qq.com

通信作者: 智小琦(1963—), 女, 博士, 教授, zxq4060@sina.com

limit of tungsten sphere tends to decrease in the form of power function and energy absorption efficiency of target decreases gradually when the mass of tungsten sphere is increased. The calculated values of energy formula and ballistic limit formula of tungsten spheres penetrating into target are in good agreement with the experimental values, which can be used to calculate the energy of penetrating into target at different initial velocities and the ballistic limit of tungsten spheres with different mass.

Keywords: tungsten sphere; body armor; pine target; ballistic limit; numerical simulation; dimensional analysis

据统计, 现代战争中有 70% 以上的士兵伤亡是由破片和枪弹所致^[1]。对第二次世界大战后的历次现代战争的战伤统计数据表明, 80% 以上的战伤是由手榴弹、迫击弹和其他爆炸物的破片所致^[2]。大面积的杀伤破片已成为威胁士兵安全的主要因素。而自防弹衣问世以后, 士兵伤亡率大幅降低。这对单兵武器的毁伤元提出了更高的要求。如何设计合适的破片使其贯穿防弹衣后对人体目标造成有效或致命伤害成为单兵破片战斗部设计的重点。

单兵破片战斗部要求体积小, 威力大, 机动性强, 而钨合金材料密度大、强度高, 球形小破片体积小、数量多、存速高, 可有效提高杀伤威力。因此, 在单兵战斗部上采用小质量钨合金球形破片是未来发展的方向之一, 既能提高单位面积的破片数量又能保持良好的机动性能。目前, 国内外关于防弹衣加人体等效靶的侵彻研究大多以标准枪弹为主, 如 Lidén 等^[3]研究了 9 mm 子弹侵彻带有软防护活体麻醉猪的非贯穿性损伤, 结果表明非贯穿损伤能对软防护后的胸膛造成严重伤害; Roberts 等^[4-5]模拟计算了 9 mm 手枪弹侵彻带有软质防弹衣的拟人体上躯干, 并与假人靶标试验结果进行了对比, 分析了非贯穿性弹道冲击对人体躯干内部器官的影响; Merkle 等^[6]采用试验与数值模拟方法, 研究了 9 mm 手枪弹侵彻带有软质防弹衣的假人体躯干, 分析了人体内部器官在非贯穿损伤下的压力分布情况; Gilson 等^[7]采用试验和数值模拟方法, 研究了 9、10.9 mm 枪弹非贯穿侵彻带软防护的明胶靶的弹道冲击响应; 董萍等^[8]利用 CT 扫描和 MIMICS 软件重建了人体躯干三维模型, 并对 9 mm 手枪弹侵彻带防弹衣的拟人体躯干靶进行了数值模拟, 研究了拟人体躯干主要脏器在弹头非贯穿冲击下的瞬态响应特性; 韩瑞国等^[9]通过试验和数值模拟研究了某步枪弹对带软、硬复合防护明胶靶标的侵彻机制; 刘坤等^[10]研究了 9 mm 全铜弹和 5.8 mm 手枪弹对带软防护明胶靶标的侵彻机理; 除此之外, 针对 92a 铅芯弹^[11]、7.62 mm^[12] 和 9 mm^[13] 枪弹分别侵彻带软防护明胶靶的动态力学特性也作了相应的研究。而关于小尺寸破片对带有防弹衣的人体等效靶的侵彻研究却鲜有报道。

本文采用国际惯用标准 25 mm 厚红松木靶作为人体等效靶, 采用实验与数值模拟方法研究小钨球对三级软体防弹衣加 25 mm 红松木靶的侵彻过程及破坏机理, 探讨钨球质量变化对弹道极限及靶板能量吸收的影响。在此基础上, 利用量纲分析的方法研究钨球的穿靶能量与初速及直径的关系, 并建立钨球的穿靶能量公式及弹道极限公式, 以为单兵破片战斗部的设计提供参考。

1 实验研究

1.1 实验布置

实验采用 12.7 mm 弹道枪发射置于尼龙弹托中的小钨球, 通过调整药筒中装药量来控制钨球的速度。钨球质量为(0.210±0.003) g, 直径为(2.80±0.02) mm, 密度为 18.1 g/cm³, 其化学成分及力学性能如表 1 所示。靶板为 FDY3R-01 型三级软体防弹衣加 25 mm 厚红松木, 两者紧密贴合成防弹衣加红松木复合靶。防弹衣由衣套和防弹层构成, 衣套为涤纶, 防弹层为凯夫拉材料, 共 45 层, 总厚度 9 mm。复合靶用专用夹具固定在钢靶架上。为测量着靶前钨球速度及穿透靶后的剩余速度, 靶前及靶后分别设置梳状通断靶, 测速装置采用南

表 1 钨球成分及其力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of tungsten sphere

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	质量分数/%				变形量/%	HRC 硬度	$R_a/\mu\text{m}$
	W	Ni	Fe	Co			
18.1	95.30	3.15	1.35	0.20	≤40	≥26	≤1.6

注: ρ 为密度, R_a 为表面粗糙度, 变形量为 7 kN 下的变形量。

京理工大学机械工程学院设计的 NLG202-Z 型六路测速仪, 精度为 $0.1 \mu\text{s}$ 。图 1 为实验所用的钨球、弹托及药筒, 图 2 为弹道实验示意图。本次实验的侵彻均为垂直侵彻。

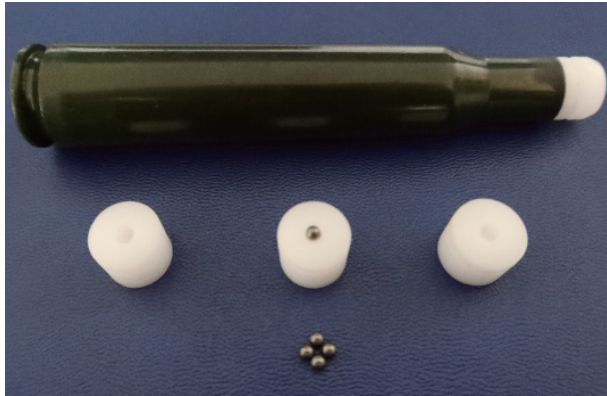


图 1 钨球、弹托及药筒

Fig. 1 Tungsten spheres, sabots and cartridge

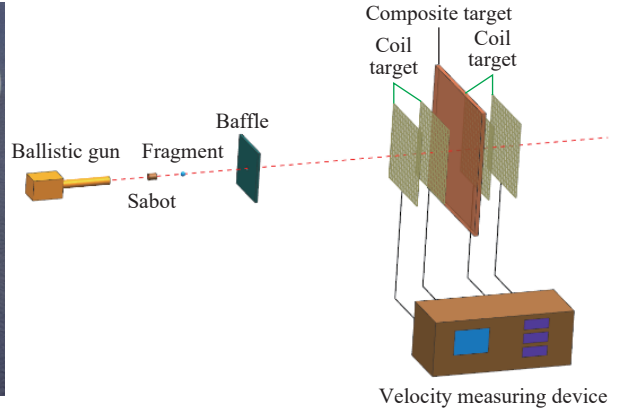


图 2 弹丸侵彻实验示意

Fig. 2 Sketch of the ballistic impact experiment

1.2 钨球侵彻防弹衣加松木靶的实验结果及分析

1.2.1 实验结果

0.21 g、直径 2.8 mm 的钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶的实验结果如表 2 所示。图 3 为实验后的防弹衣加红松木复合靶, 其中图 3(a) 为单独的防弹衣, 图 3(b) 为防弹衣加红松木复合靶。

表 2 钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶的实验结果

Table 2 Experimental results of tungsten spheres penetrating into pine target covered with body armor

序号	着靶速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	剩余速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	结果
1	681.2	-	穿透防弹衣, 嵌入松木靶
2	700.4	74.8	穿透防弹衣和松木靶
3	711.7	111.6	穿透防弹衣和松木靶
4	725.5	160.4	穿透防弹衣和松木靶
5	744.5	194.2	穿透防弹衣和松木靶
6	748.0	204.9	穿透防弹衣和松木靶
7	753.4	220.9	穿透防弹衣和松木靶
8	775.7	250.6	穿透防弹衣和松木靶



(a) Body armor



(b) Body armor and pine target

图 3 实验后的防弹衣加红松木复合靶

Fig. 3 Pine target covered with body armor after the experiment

1.2.2 实验结果处理与分析

本文利用 Recht 等^[14]提出的 R-I 公式以获得钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶的弹道极限, R-I 公式为:

$$v_r = a(v_i^p - v_{bl}^p)^{(1/p)} \quad (1)$$

式中: v_i 为破片着靶速度, m/s; v_r 为破片剩余速度, m/s; v_{bl} 为弹道极限, m/s; a 、 p 为模型参数。

依据文献 [15], p 值设定为 2。 a 和 v_{bl} 可根据实验数据通过最小二乘法拟合得到。图 4 给出了钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶的剩余速度与着靶速度关系曲线。由图 4 可看出, 通过式 (1) 拟合出的关系曲线拟合效果较好。表 3 给出了通过式 (1) 计算所得的弹道极限及模型参数。

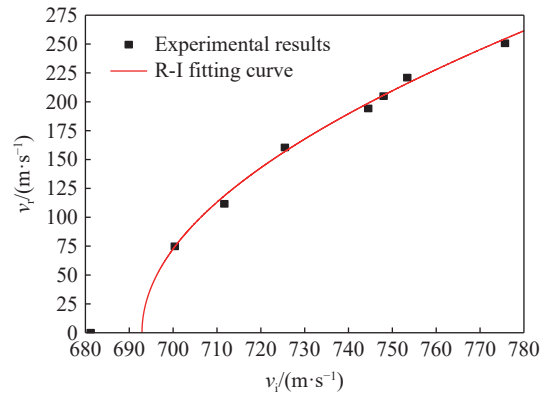


图 4 钨球剩余速度-着靶速度曲线

Fig. 4 Curve of residual velocity-impact velocity of tungsten spheres

表 3 弹道极限及模型参数

Table 3 Ballistic limit and model parameters

钨球规格	a	p	$v_{bl}/(m \cdot s^{-1})$
质量 0.21 g / 直径 2.8 mm	0.73	2	692.9

2 数值模拟研究

2.1 数值模型及其参数

利用 TrueGrid 软件建模和划分网格, 模型均选用 8 节点 6 面体单元。为节约计算时间, 考虑到模型的对称性, 模型简化为 1/4 模型。钨球尺寸及靶板厚度与实验状态一致, 靶板采用圆形靶, 其中防弹衣采用分层建模, 每层 0.2 mm 厚, 共 45 层。靶板半径设为 30 mm (大于钨球直径 10 倍), 以减小边界效应对侵彻过程的影响。为兼顾计算的时长与精度, 网格采用渐进式, 弹着点中心 8 倍半径区域加密, 向外逐渐稀疏。密集区网格尺寸控制在 0.10~0.15 mm。稀疏区网格尺寸控制在 0.15~1.27 mm, 钨球最小网格尺寸为 0.01 mm, 有限元模型如图 5 所示。

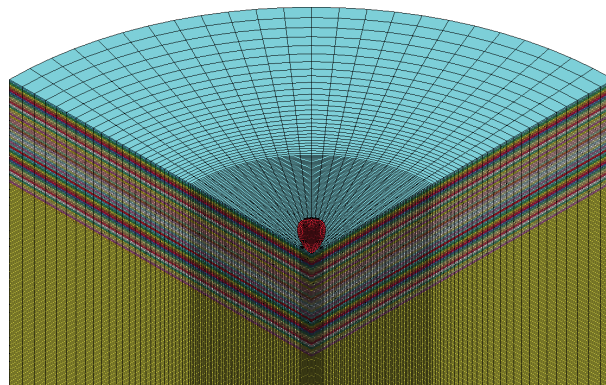


图 5 有限元模型

Fig. 5 Finite element model

数值模拟选用 LSDYNA-3D 软件, 单位制设为 cm-g- μ s, 算法采用 Lagrange 算法。根据模型结构的对称性, 在模型对称面添加对称边界条件, 在靶板边缘添加无反射边界条件。弹靶之间的接触定义为面面侵蚀接触, 防弹衣纤维层与层之间的接触定义为固连失效接触, 防弹衣与松木靶之间的接触定义为自

动面面接触。

钨球选用考虑应变率效应的弹塑性材料模型 (MAT_PLASTIC_KINEMATIC), 其材料模型参数^[16]见表 4, 其中 ρ 为密度, E 为弹性模量, μ 为泊松比, σ_y 为屈服强度, E_t 为切线模量, β 为硬化参数, R_1 与 R_2 为应变率参数, ε_f 为失效应变。

防弹衣属于层合结构, 选用基于经典层合理理论和 Chang-Chang 失效准则^[17-18]的复合材料损伤模型 (MAT_COMPOSITE_DAMAGE), 具体材料模型参数^[19]见表 5, 其中 E_1 、 E_2 、 E_3 为各向弹性模量, μ_{21} 、 μ_{32} 、 μ_{31} 为各向泊松比, G_{12} 、 G_{23} 、 G_{31} 为各向剪切模量, κ_f 为损坏材料体积模量, G_s 为面内剪切强度, T_x 、 T_y 分别为纵向和横向拉伸强度, C_y 为横向压缩强度, α 为非线性剪切应力修正系数, T_n 为法向拉伸强度, G_{yz} 和 G_{zx} 为横向剪切强度。

表 4 钨球材料模型参数

Table 4 Material model parameters of tungsten sphere

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	μ	σ_y/MPa	E_t/MPa	β	R_1	R_2	ε_f
18.1	367	0.303	1506	792	1	3.9	6	1.2

表 5 凯夫拉材料模型参数

Table 5 Material model parameters of kevlar

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E_1/GPa	E_2/GPa	E_3/GPa	μ_{21}	μ_{31}	μ_{32}
1.35	21	21	4.6	0.31	0.14	0.14
G_{12}/GPa	G_{23}/GPa	G_{31}/GPa	κ_f/GPa	G_s/GPa	T_x/GPa	T_y/GPa
1.2	1.2	1.2	2	0.35	1.0	1.0
C_y/GPa	α	T_n/GPa	G_{yz}/GPa		G_{zx}/GPa	
0.8	0.5	0.55	0.55		0.55	

文献 [20] 指出, 红松木在比例极限下可近似看成弹性, 当应力超过比例极限后, 红松木发生变形和破坏, 故红松木可选用 MAT_ELASTIC 材料模型并添加单元控制失效算法 (ADD_EROSION) 予以描述, 其材料模型参数^[21]见表 6, 其中 σ_f 为失效应力。

表 6 红松木材料模型参数

Table 6 Material model parameters of pine

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	μ	σ_f/MPa
0.46	11.68	0.31	294

2.2 数值模型的验证

利用实验数据对仿真模型进行验证, 结果见表 7 和图 6。由表 7 可以看出, 剩余速度的仿真值与实验值最大相对误差不超过 10%, 满足工程误差要求。同时, 根据式 (1) 对计算得到的剩余速度与着靶速度的拟合可得: 钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶的弹道极限为 690.5 m/s, 与实验所得的弹道极限相对误差仅为 -0.25%。可见该数值模型及其参数可信。

表 7 模拟值与实验值的对比

Table 7 Comparison between simulated results and experimental results

$v_i/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_i/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		相对误差/%
	实验值	计算值	
681.2	0	0	0
700.4	74.8	80.9	8.16
711.7	111.6	119.2	6.81
725.5	160.4	168.3	4.93
744.5	194.2	202.8	4.43
748.0	204.9	209.2	2.10
753.4	220.9	218.4	-1.13
775.7	250.6	253.9	1.32

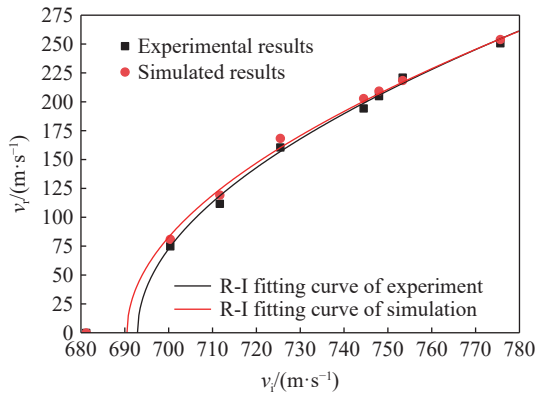


图 6 计算值与实验值的对比

Fig. 6 Comparison between simulated results and experimental results

2.3 侵彻过程及破坏机理分析

图 7 给出了不同着靶速度下钨球的速度 v (图 7(a)) 和加速度 a 变化曲线 (图 7(b))。从图 7 可看出, 不同侵彻速度下钨球的速度和加速度变化趋势相近。以 $v_i=748.0 \text{ m/s}$ 为例分析侵彻过程, 其速度和加速度随时间的变化分别如图 8(a) 和图 8(b) 所示。在图 8(a) 和图 8(b) 中分别提取 5 个特征点并用相同字母不同的角标表示: 其中 A_0 和 A_1 点表示钨球与防弹衣初始接触时刻; B_0 和 B_1 点表示钨球侵彻防弹衣阻力达到最大时刻; C_0 和 C_1 点表示钨球刚穿透防弹衣并开始侵彻松木靶时刻; D_0 和 D_1 点表示钨球开始稳定侵彻松木靶时刻; E_0 和 E_1 点表示钨球在松木靶内部稳定侵彻结束时刻; F_0 和 F_1 点表示钨球完全穿透松木靶时刻。根据钨球速度的衰减过程, 可大致将钨球侵彻过程分为侵彻防弹衣 (A_0C_0 段) 和侵彻松木靶 (C_0F_0 段) 两阶段。

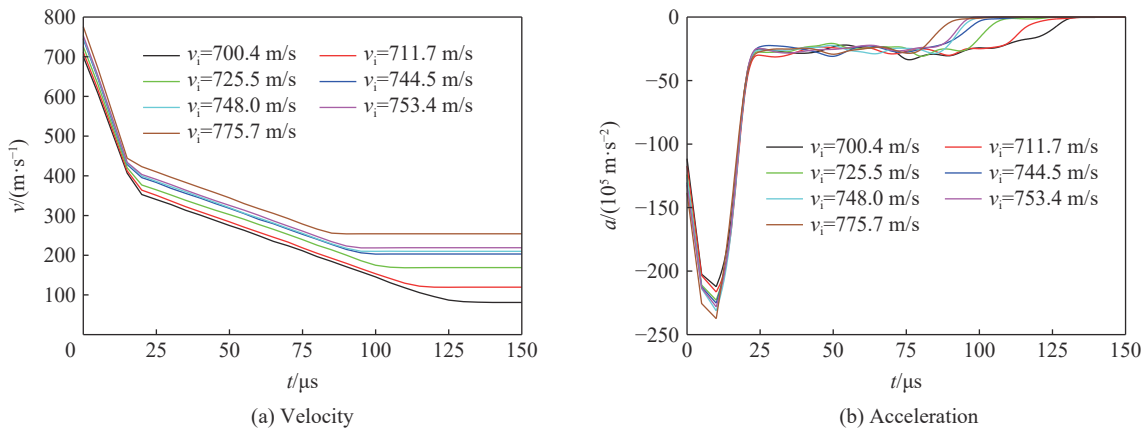


图 7 不同着靶速度下钨球速度与加速度变化曲线

Fig. 7 Variation curves of velocity and acceleration of tungsten sphere at different impact velocities

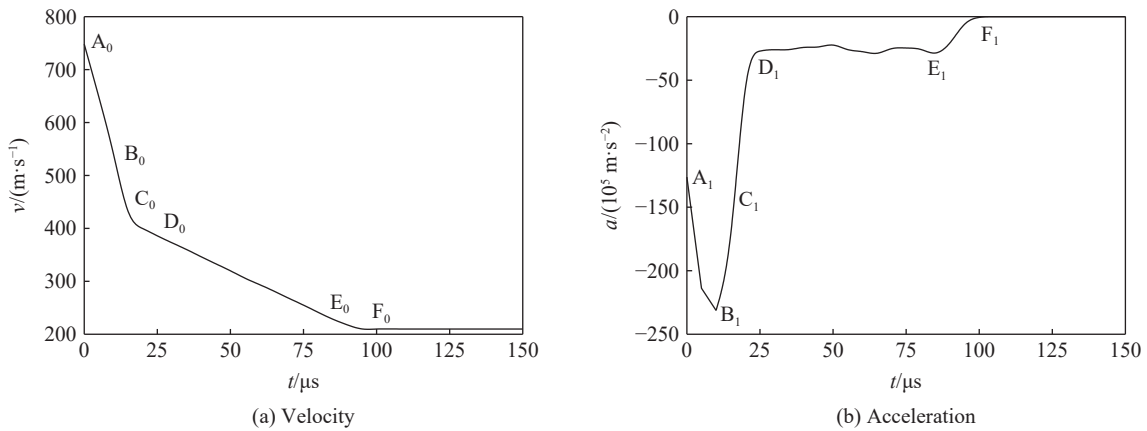


图 8 钨球速度与加速度变化曲线 ($v_i=748.0 \text{ m/s}$)

Fig. 8 Variation curves of velocity and acceleration of tungsten sphere ($v_i=748.0 \text{ m/s}$)

(1) 侵彻防弹衣阶段。

A_0B_0 段, 在侵彻防弹衣初期, 钨球速度大, 动能高, 当钨球与防弹衣初始接触时, 由于防弹衣的阻碍作用, 钨球速度急剧下降, 并对防弹衣产生压力作用, 此时纤维受到压缩和剪切作用; 当剪应力超过极限时, 纤维发生剪切断裂破坏。同时, 钨球冲击防弹衣产生的应力波沿纤维轴向和靶体纵向两个方向传播; 在纤维轴向上, 应力波通过基体连接传递至周围其他纤维, 二维面积上产生基体开裂、纤维拉伸变形和断裂等现象; 在靶体纵向上生成压缩波, 压缩波沿靶体纵向传递至基体与纤维的分界面时发生反复透射和反射并形成拉伸波, 当拉伸波强度超过基体与纤维间或纤维层间结合强度时, 基体与纤维脱粘, 纤维层产生分层破坏^[22]。侵彻 $10 \mu\text{s}$ 左右, 钨球阻力达到最大, 此时穿透 17 层纤维。 B_0C_0 段, 随着侵彻的进行, 由于断裂破坏的纤维不断增多, 且未断裂的纤维已受到一定的拉伸作用使其强度降低, 钨球侵彻阻力逐渐减小; 虽然钨球速度持续下降, 但降低幅度有所减缓, 直至贯穿防弹衣到达 C_0 点。

(2) 侵彻红松靶阶段。

C_0D_0 段, 穿透防弹衣后, 钨球主要受松木靶阻力作用; 由于松木材质较软, 屈服强度较低, 因此, 钨球侵彻松木靶的阻力较防弹衣的弱, 表现在速度衰减较 A_0C_0 段缓慢, 其侵彻阻力继续减小直至侵彻 1.1 mm 厚到达 D_0 点。 D_0E_0 段, 钨球侵入松木靶并进入稳定侵彻阶段, 此时松木靶在钨球压力作用下发生剪切破坏。由于木靶材质较均匀, 钨球速度几乎呈线性降低, 即速度衰减率基本不变, 在 $85 \mu\text{s}$ 左右, 稳定侵彻到达 E_0 点, 此时钨球侵彻松木靶 23.3 mm 厚, 还剩 1.7 mm 厚未穿透, 松木靶背面产生微小裂纹并发生部分剥落现象。 E_0F_0 段: 钨球进入穿透松木靶阶段, 其头部已经露出松木靶; 受靶板背面自由边界的影响, 钨球侵彻阻力迅速减小, 直到完全穿透松木靶达到 F_0 点, 松木靶在钨球的作用下, 主要发生剪切和冲塞剥落破坏。

结合图 4 和图 7(a) 可看出, 随着钨球着靶速度的提高, 剩余速度增加但增加斜率逐渐减小。这主要与复合靶的吸能有关。在弹道极限附近的速度范围内, 随着着靶速度的提高, 钨球侵彻能力增强, 弹靶作用时间相对缩短, 这样拉伸波不能及时沿靶体纵向传播, 导致纤维的分层损伤降低, 纤维分层吸收钨球动能的能力下降, 故纤维拉伸分层吸能占总吸能比例逐渐降低。图 9 给出了不同着靶速度下松木靶背面的损伤形貌。从图 9 可知, 随着速度的提高, 松木靶背面剥落程度降低, 冲塞剥落吸能占总吸能比例降低, 复合靶能量吸收不稳定, 因而剩余速度曲线随着靶速度的提高变得陡峭。当着靶速度进一步提高时, 基体开裂、纤维剪切断裂和松木靶剪切破坏成为复合靶主要吸能方式, 复合靶吸收能量比较稳定, 剩余速度曲线更加平缓。从图 7(b) 上看, 由于松木靶破坏模式的转变, 在钨球穿透松木靶阶段, 随着着靶速度的提高, 钨球负加速度下降更快。



图 9 不同侵彻速度下松木靶背面的损伤形貌

Fig. 9 Damage morphologies of the back of pine target at different impact velocities

图 10 给出了防弹衣正面与背面的典型 von Mises 应力变化过程。

由图 10 可知, 破片冲击产生的应力波在纤维层面内通过基体连接传向周围其他纤维, 纤维轴向上的波阵面形状类似双纽线^[10], 着靶处纤维在应力波作用下产生类似“十”字型的损伤, 宏观表现为基体开裂, 图 11 的实验结果也验证了这一点。

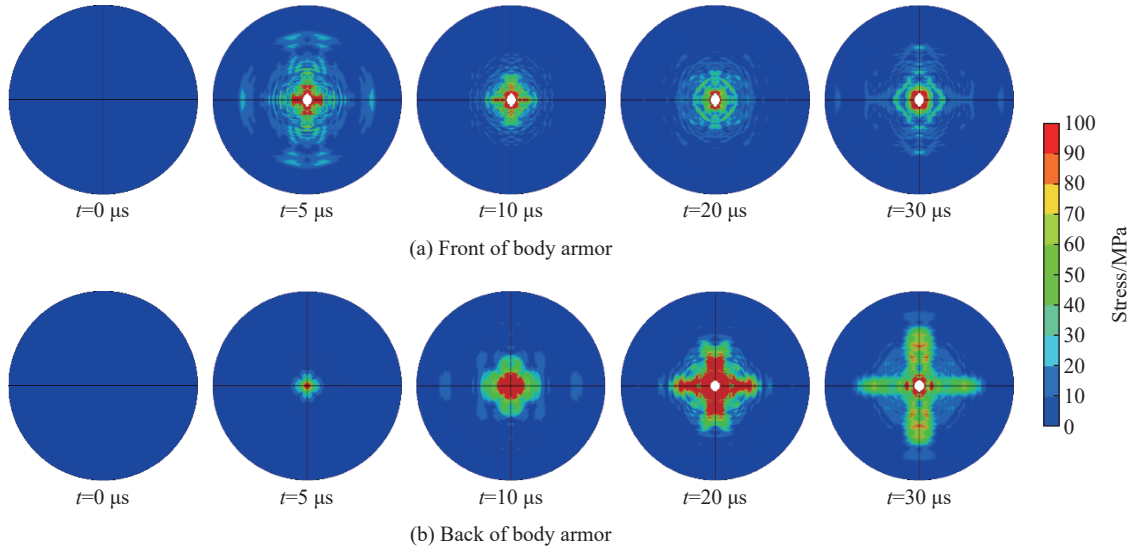


图 10 防弹衣正面与背面的典型 von Mises 应力变化

Fig. 10 Typical von Mises stress variation of front and back of body armor

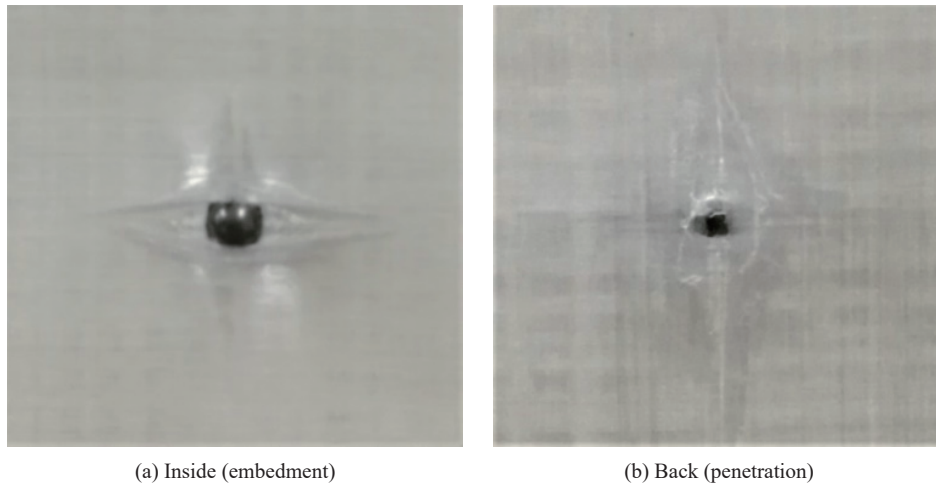


图 11 纤维层面内损伤

Fig. 11 In-plane damage of fiber layer

2.4 质量变化对侵彻的影响

2.4.1 质量变化对弹道极限的影响

表 8 给出了不同质量(m)钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶弹道极限(v_{bl})的计算结果。图 12 给出了弹道极限随钨球质量变化的关系曲线。

从图 12 可看出, 随着钨球质量的增加, 钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶的弹道极限呈幂函数递减趋势。从减轻破片战斗部质量提高射程或增加破片数量提高杀伤威力等角度考虑, 应存在合适的破片质量范围, 既能增加破片数量又能提高破片对人体的杀伤。

表 8 不同质量钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶
弹道极限的模拟结果

Table 8 Simulated results of ballistic limit of tungsten spheres with different mass penetrating into pine target covered with body armor

m/g	$v_{bl}/(m \cdot s^{-1})$
0.21	690.5
0.26	647.0
0.31	619.0
0.36	595.0
0.41	575.0
0.46	556.0

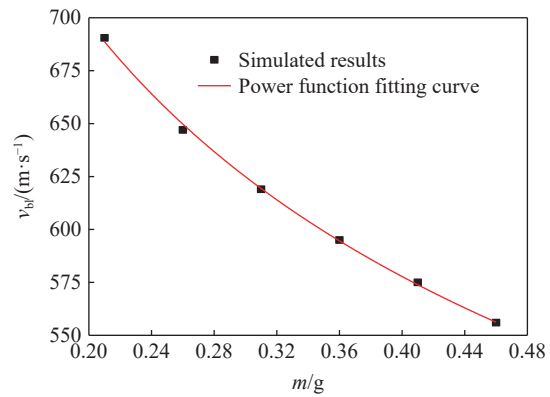


图 12 弹道极限-质量变化曲线

Fig. 12 Curve of ballistic limit-mass of tungsten spheres

2.4.2 质量变化对靶板能量吸收的影响

在侵彻靶板过程中, 破片部分动能被靶板吸收, 靶板的能量吸收可用能量吸收率来表征^[23], 定义靶板的能量吸收率 η 为:

$$\eta = \frac{E_{abs}}{E_k} = \frac{0.5m(v_i^2 - v_r^2)}{0.5mv_i^2} = 1 - \frac{v_r^2}{v_i^2} \quad (2)$$

式中: E_{abs} 为靶板吸收的能量, 即破片损失的动能; E_k 为破片初始动能。

表 9 给出了不同质量钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶的仿真结果。图 13 给出了靶板能量吸收率 η 在不同着靶速度下的变化曲线。由图 13 可知, 当钨球嵌入靶板时, 靶板的能量吸收率为 1。若钨球穿透靶板, 在同一着靶速度下, 靶板的能量吸收率随钨球质量增加而降低。并且随着着靶速度的增加, 靶板能量吸收率急剧下降。

表 9 不同质量钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶的仿真结果

Table 9 Simulated results of tungsten spheres with different mass penetrating into pine target covered with body armor

着靶速度/ $(m \cdot s^{-1})$	$m=0.21 \text{ g}$		$m=0.26 \text{ g}$		$m=0.31 \text{ g}$	
	剩余速度/ $(m \cdot s^{-1})$	靶板能量吸收率	剩余速度/ $(m \cdot s^{-1})$	靶板能量吸收率	剩余速度/ $(m \cdot s^{-1})$	靶板能量吸收率
550	0	1	0	1	0	1
600	0	1	0	1	0	1
650	0	1	26.2	0.998	156.7	0.942
700	79.2	0.987	188.3	0.928	254.0	0.868
750	212.6	0.920	281.6	0.859	322.5	0.815
800	294.3	0.865	350.2	0.808	390.3	0.762
着靶速度/ $(m \cdot s^{-1})$	$m=0.36 \text{ g}$		$m=0.41 \text{ g}$		$m=0.46 \text{ g}$	
	剩余速度/ $(m \cdot s^{-1})$	靶板能量吸收率	剩余速度/ $(m \cdot s^{-1})$	靶板能量吸收率	剩余速度/ $(m \cdot s^{-1})$	靶板能量吸收率
550	0	1	0	1	0	1
600	65.1	0.988	121.0	0.959	172.8	0.917
650	197.6	0.908	232.4	0.872	267.1	0.831
700	287.4	0.831	315.0	0.798	345.0	0.757
750	354.9	0.776	376.7	0.748	400.3	0.715
800	416.8	0.729	437.1	0.701	457.0	0.674

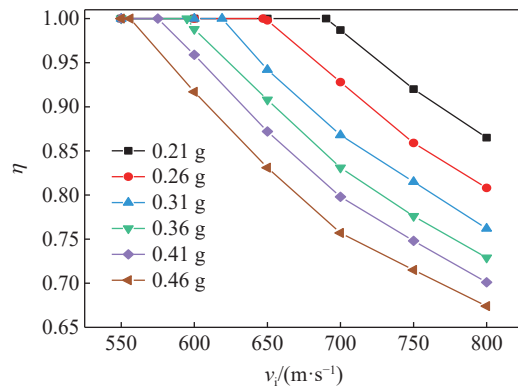


图 13 靶板能量吸收率-着靶速度曲线

Fig. 13 Curve of energy absorption efficiency of target-impact velocity

3 量纲分析

穿靶能量 E_c , 即消耗破片的动能, 是反映破片侵彻靶板特性的一个重要参数。为进一步定量研究钨球穿靶能量与着靶速度以及直径之间的关系, 本文依据量纲分析建立小钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶的穿靶能量计算公式。

通过理论分析, 影响钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶穿靶能量的主要物理量如表 10 所示。

表 10 影响穿靶能量的主要的物理量

Table 10 Main physical quantities affecting the energy of penetrating into target

材料名称	物理量	量符号	量纲式
钨球	着靶速度	v_i	LT^{-1}
	密度	ρ_p	ML^{-3}
	直径	D_p	L
	弹性模量	E_p	$L^{-1}MT^{-2}$
	屈服强度	σ_{sp}	$L^{-1}MT^{-2}$
	特征应变	ε_p	1
	声速	c_p	LT^{-1}
	防弹衣	密度	ρ_f
厚度		h_f	L
弹性模量		E_f	$L^{-1}MT^{-2}$
抗压强度		σ_{sf}	$L^{-1}MT^{-2}$
抗剪强度		σ_{tf}	$L^{-1}MT^{-2}$
抗拉强度		σ_{ff}	$L^{-1}MT^{-2}$
特征应变		ε_f	1
声速		c_f	LT^{-1}
红松木	密度	ρ_s	ML^{-3}
	厚度	h_s	L
	弹性模量	E_s	$L^{-1}MT^{-2}$
	失效力	σ_{ss}	$L^{-1}MT^{-2}$
	特征应变	ε_s	1
	声速	c_s	LT^{-1}

可见, 穿靶能量 E_c 是关于上述物理量的函数:

$$E_c = f(v_i, \rho_p, D_p, E_p, \sigma_{sp}, \varepsilon_p, c_p, \rho_f, h_f, E_f, \sigma_{sf}, \sigma_{rf}, \sigma_{ff}, \varepsilon_f, c_f, \rho_s, h_s, E_s, \sigma_{ss}, \varepsilon_s, c_s) \quad (3)$$

选取 ρ_p 、 D_p 和 σ_{sp} 为量纲独立变量, 根据量纲齐次原则, 其他导出量可写成以下无量纲形式:

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{E_c}{D_p^3 \sigma_{sp}}, \Pi_1 = \frac{v_i}{\sqrt{\sigma_{sp}/\rho_p}}, \Pi_2 = \frac{E_p}{\sigma_{sp}}, \Pi_3 = \varepsilon_p, \Pi_4 = \frac{c_p}{\sqrt{\sigma_{sp}/\rho_p}}, \Pi_5 = \frac{\rho_f}{\rho_p}, \\ \Pi_6 &= \frac{h_f}{D_p}, \Pi_7 = \frac{E_f}{\sigma_{sp}}, \Pi_8 = \frac{\sigma_{sf}}{\sigma_{sp}}, \Pi_9 = \frac{\sigma_{rf}}{\sigma_{sp}}, \Pi_{10} = \frac{\sigma_{ff}}{\sigma_{sp}}, \Pi_{11} = \varepsilon_f, \Pi_{12} = \frac{c_f}{\sqrt{\sigma_{sp}/\rho_p}}, \\ \Pi_{13} &= \frac{\rho_s}{\rho_p}, \Pi_{14} = \frac{h_s}{D_p}, \Pi_{15} = \frac{E_s}{\sigma_{sp}}, \Pi_{16} = \frac{\sigma_{ss}}{\sigma_{sp}}, \Pi_{17} = \varepsilon_s, \Pi_{18} = \frac{c_s}{\sqrt{\sigma_{sp}/\rho_p}} \end{aligned}$$

根据 Π 定理, 式 (3) 可写为:

$$\Pi = \frac{E_c}{D_p^3 \sigma_{sp}} = f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{18}) \quad (4)$$

在弹靶材料不变的情况下, 除了 Π 、 Π_1 、 Π_6 和 Π_{14} 外, 其余导出量均为常数, 式 (4) 可简化为:

$$\Pi = \frac{E_c}{D_p^3 \sigma_{sp}} = f\left(\frac{v_i}{\sqrt{\sigma_{sp}/\rho_p}}, \frac{h_f}{D_p}, \frac{h_s}{D_p}\right) = C_0 \left(\frac{v_i}{\sqrt{\sigma_{sp}/\rho_p}}\right)^\alpha \left(\frac{h_f}{D_p}\right)^\beta \left(\frac{h_s}{D_p}\right)^\gamma \quad (5)$$

式中: C_0 、 α 、 β 、 γ 均为待定常数。

将式 (5) 展开:

$$E_c = C_0 \sigma_{sp}^{1-0.5\alpha} \rho_p^{0.5\alpha} h_f^\beta h_s^\gamma v_i^\alpha \left(\frac{1}{D_p}\right)^{\beta+\gamma-3} \quad (6)$$

由于本实验中的防弹衣和红松木材料及厚度不变, 钨球材料不变, 令:

$$\delta = \beta + \gamma - 3$$

$$C_1 = C_0 \sigma_{sp}^{1-0.5\alpha} \rho_p^{0.5\alpha} h_f^\beta h_s^\gamma$$

则式 (6) 可写为:

$$E_c = C_1 v_i^\alpha \left(\frac{1}{D_p}\right)^\delta \quad (7)$$

式中: C_1 、 α 、 δ 为待定常数。

由式 (7) 可知, 在防弹衣和红松木材料及其厚度不变以及钨球材料不变的情况下, 穿靶能量 E_c 只与着靶速度 v_i 和钨球直径 D_p 有关。

为方便求解, 将式 (7) 两端同时取对数:

$$\ln E_c = \alpha \ln v_i + \delta \ln \frac{1}{D_p} + \ln C_1 \quad (8)$$

令 $y = \ln E_c$, $x_1 = \ln v_i$, $x_2 = \ln \frac{1}{D_p}$, $k = \ln C_1$, 则式 (8) 为:

$$y = \alpha x_1 + \delta x_2 + k \quad (9)$$

利用表 9 中的数据对式 (9) 进行二元一次线性回归拟合, 可得:

$$\alpha = 0.94, \quad \delta = -2.04, \quad k = 9.77$$

将 α 、 δ 和 k 回代至式 (7), 有:

$$E_c = e^{9.77} v_i^{0.94} D_p^{2.04} \quad (10)$$

为验证式 (10) 的有效性, 对 0.17 g、直径 2.6 mm 和 0.44 g、直径 3.6 mm 两种小钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶进行了侵彻实验。表 11 对比了通过实验和式 (10) 计算得到的穿靶能量。由表 11 可知, 利用

式(10)计算的穿靶能量与实验所得的穿靶能量最大相对误差不超过 10%, 满足工程误差要求。无需剩余速度, 式(10)仅用着靶速度和破片直径就能预测不同质量钨球在不同着靶速度下的穿靶能量(适用范围为 $m < 0.46 \text{ g}$)。

表 11 不同方法计算的穿靶能量的对比

Table 11 Comparison of energy of penetrating into target calculated by different methods

钨球规格	$v_i/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_p/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	E_c/J		相对误差/%
			实验结果	量纲分析结果	
质量0.17 g 直径2.6 mm	753.6	124.6	46.95	47.22	0.58
	771.3	187.7	47.57	48.26	1.45
	786.0	230.1	48.01	49.12	2.31
	809.1	296.8	48.16	50.48	4.82
	834.9	357.9	48.36	51.99	7.51
	869.6	410.8	49.93	54.02	8.19
质量0.44 g 直径3.6 mm	578.4	78.2	72.25	71.52	-1.01
	597.7	141.8	74.17	73.76	-0.55
	610.9	187.2	74.39	75.29	1.21
	639.5	248.0	76.44	78.60	2.83
	660.3	260.9	80.94	81.00	0.07
	698.3	335.1	82.57	85.37	3.39

值得注意的是, 当着靶速度 v_i 为弹道极限 v_{bl} 时, 穿靶能量为极限穿靶能量:

$$E_c = 0.5mv_{bl}^2 \quad (11)$$

将式(11)代入式(7)可推导出计算弹道极限的另一个公式:

$$v_{bl} = \left[\frac{2C_1}{m} \left(\frac{1}{D_p} \right)^\delta \right]^{\frac{1}{2-\alpha}} = \left[\frac{2e^{9.77}}{m} D_p^{2.04} \right]^{\frac{1}{1.06}} \quad (12)$$

根据试验数据, 利用式(12)计算弹道极限, 并与利用式(1) R-I 公式计算得到的弹道极限进行对比, 结果如表 12 所示。由表 12 可知, 与式(1)公式相比, 式(12)仅利用破片的直径和质量就能计算弹道极限, 且相对误差不超过 5%, 满足工程应用要求。因此, 式(12)可作为计算不同质量钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶弹道极限的一个经验公式(适用范围为 $m < 0.46 \text{ g}$)。

表 12 式(1)和式(12)计算的弹道极限的对比

Table 12 Comparison of ballistic limit calculated by formula (1) and formula (12)

钨球规格	$v_{bl}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		相对误差/%
	式(1)	式(12)	
质量0.17 g/直径2.6 mm	742.3	738.1	-0.57
质量0.21 g/直径2.8 mm	692.9	697.4	0.65
质量0.44 g/直径3.6 mm	570.1	562.9	-1.26

4 结 论

采用实验和数值模拟方法研究了小钨球对三级软体防弹衣加 25 mm 红松靶的侵彻过程及破坏机理; 探讨了钨球质量变化对弹道极限及靶板能量吸收的影响; 利用量纲分析研究了钨球穿靶能量与其初

速及直径的关系,建立了钨球的穿靶能量公式及弹道极限公式。得出研究结论如下:

(1) 0.17 g、直径 2.6 mm, 0.21 g、直径 2.8 mm 以及 0.44 g、直径 3.6 mm 的小钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶的弹道极限分别为 742.3、692.9 和 570.1 m/s;

(2) 在钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶的过程中,防弹衣的破坏形式主要表现为基体开裂、纤维断裂和拉伸分层,纤维层面内出现类似“十”字型的损伤,而松木靶则以剪切和冲塞剥落破坏为主;

(3) 随着钨球质量的增加,钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶的弹道极限呈幂函数减小趋势,靶板的能量吸收率逐渐降低;

(4) 利用量纲分析法建立了钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶的穿靶能量计算公式及弹道极限计算公式,可分别用于计算不同侵彻速度下的穿靶能量和不同质量钨球的弹道极限。

参考文献:

- [1] 程可. 轻武器杀伤元对明胶靶标侵彻的数值仿真研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012: 1-2.
- [2] 黄献聪. 军用防弹衣的性能需求与发展方向 [C]// 2005 现代服装纺织高科技发展研讨会论文集. 北京: 北京纺织工程学会, 2005: 421-427.
- [3] LIDÉN E, BERLIN R, JANZON B, et al. Some observations relating to behind-body armour blunt trauma effects caused by ballistic impact [J]. *The Journal of Trauma: Injury, Infection, and Critical Care*, 1988, 28(S1): 145-148. DOI: 10.1097/00005373-198801001-00029.
- [4] ROBERTS J C, O'CONNOR J V, WARD E E. Modeling the effect of nonpenetrating ballistic impact as a means of detecting behind-armor blunt trauma [J]. *Journal of Trauma: Injury, Infection, and Critical Care*, 2005, 58(6): 1241-1251. DOI: 10.1097/01.TA.0000169805.81214.DC.
- [5] ROBERTS J C, MERKLE A C, BIERMANN P J, et al. Computational and experimental models of the human torso for non-penetrating ballistic impact [J]. *Journal of Biomechanics*, 2007, 40(1): 125-136. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2005.11.003.
- [6] MERKLE A C, WARD E E, O'CONNOR J V, et al. Assessing behind armor blunt trauma (BABT) under NIJ Standard-0101.04 conditions using human torso models [J]. *The Journal of Trauma: Injury, Infection, and Critical Care*, 2008, 64(6): 1555-1561. DOI: 10.1097/TA.0b013e318160ff3a.
- [7] GILSON L, RABET L, IMAD A, et al. Experimental and numerical assessment of non-penetrating impacts on a composite protection and ballistic gelatine [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 136: 103417. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103417.
- [8] 董萍, 陈菁, 张启宽, 等. 利用有限元研究非贯穿弹道冲击防弹衣后人体躯干的力学响应 [J]. *医用生物力学*, 2012, 27(3): 270-275. DOI: 10.16156/j.1004-7220.2012.03.013.
DONG P, CHEN J, ZHANG Q K, et al. Finite element analysis on mechanical responses of human torso with body armor to non-penetrating ballistic impact [J]. *Journal of Medical Biomechanics*, 2012, 27(3): 270-275. DOI: 10.16156/j.1004-7220.2012.03.013.
- [9] 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.
- [10] 刘坤, 吴志林, 宁建国, 等. 手枪弹对带软防护的明胶靶标侵彻机理与实验研究 [J]. *兵工学报*, 2018, 39(1): 1-17. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.01.001.
LIU K, WU Z L, NING J G, et al. Investigation on the mechanism and experiment of pistol cartridge penetrating into gelatin target with soft body armor [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(1): 1-17. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.01.001.
- [11] 黄拱武. 弹体撞击带纤维软防护明胶靶标的数值仿真研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013: 41-43.
- [12] 孙非, 马力, 朱一辉, 等. 手枪弹对带 UHMWPE 软防护明胶靶标冲击效应的数值分析 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(13): 20-26. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.13.004.
SUN F, MA L, ZHU Y H, et al. Numerical analysis for impact effects of a pistol bullet on a gelatin target covered with UHMWPE fiber armor [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(13): 20-26. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.13.004.

- [13] 唐刘建, 温垚珂, 薛本源, 等. 手枪弹侵彻有防护仿生人体躯干靶标试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2019, 38(4): 245–249. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.04.036.
TANG L J, WEN Y K, XUE B Y, et al. Pistol bullet impact soft body armor covered bionic human torso [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(4): 245–249. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.04.036.
- [14] RECHT R F, IPSON T W. Ballistic perforation dynamics [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1963, 30(3): 384–390. DOI: 10.1115/1.3636566.
- [15] 乔纳斯 A-朱卡斯, NICHOLAS T, SWIFT H F, 等. 碰撞动力学 [M]. 张志云, 丁世用, 魏传中, 译. 北京: 兵器工业出版社, 1989: 200–205.
- [16] 王雪, 智小琦, 徐锦波, 等. 球形破片侵彻多层板弹道极限的量纲分析 [J]. *高压物理学报*, 2019, 33(6): 065102. DOI: 10.11858/gywlb.20190757.
WANG X, ZHI X Q, XU J B, et al. Dimensional analysis of ballistic limit of spherical fragments penetrating multi-layer plate [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(6): 065102. DOI: 10.11858/gywlb.20190757.
- [17] CHANG F K, CHANG K Y. Post-failure analysis of bolted composite joints in tension or shear-out mode failure [J]. *Journal of Composite Materials*, 1987, 21(9): 809–833. DOI: 10.1177/002199838702100903.
- [18] CHANG F K, CHANG K Y. A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations [J]. *Journal of Composite Materials*, 1987, 21(9): 834–855. DOI: 10.1177/002199838702100904.
- [19] 胡年明, 陈长海, 侯海量, 等. 高速弹丸冲击下复合材料层合板损伤特性仿真研究 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2017, 40(3): 66–70. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20170427.008.
HU N M, CHEN C H, HOU H L, et al. Simulation on damage characteristic of composite laminates under high-velocity projectile impact [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2017, 40(3): 66–70. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20170427.008.
- [20] 张建海. 攻坚弹药子弹弹道环境的初步试验研究与数值分析 [D]. 南京: 南京理工大学, 2006: 24–25.
- [21] 景彤, 郭子云, 雷文星, 等. 步枪弹 M855 与 M855A1 的侵彻效能对比仿真 [J]. *弹箭与制导学报*, 2018, 38(4): 45–48, 54. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2018.04.011.
JING T, GUO Z Y, LEI W X, et al. Simulation comparison of penetration efficiency of rifle projectile M855 and M855A1 [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2018, 38(4): 45–48, 54. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2018.04.011.
- [22] 刘国繁. 层合结构复合材料抗弹机理研究及模拟仿真 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015: 27–28.
- [23] 邓云飞, 袁家俊, 徐建新. 半球形头弹不同角度冲击下编织复合材料板的侵彻特性 [J]. *复合材料学报*, 2018, 35(4): 843–849. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20170704.002.
DENG Y F, YUAN J J, XU J X. Penetration characteristics of woven composite laminates impacted by hemispherical-nosed projectiles at different angles [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(4): 843–849. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20170704.002.

(责任编辑 王小飞)