

小钨球对防弹衣加松木靶的侵彻研究

唐昌州 智小琦 徐锦波 陈志斌

Research on Small Tungsten Spheres Penetrating into Pine Target with Body Armor

TANG Changzhou, ZHI Xiaoqi, XU Jinbo, CHEN Zhibin

引用本文:

唐昌州, 智小琦, 徐锦波, 等. 小钨球对防弹衣加松木靶的侵彻研究[J]. 高压物理学报, 2020, 34(5):055101. DOI: 10.11858/gywlxb.20200506

TANG Changzhou, ZHI Xiaoqi, XU Jinbo, et al. Research on Small Tungsten Spheres Penetrating into Pine Target with Body Armor[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(5):055101. DOI: 10.11858/gywlxb.20200506

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20200506

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

球形破片侵彻多层板弹道极限的量纲分析

Dimensional Analysis of Ballistic Limit of Spherical Fragments Penetrating Multi-Layer Plate 高压物理学报. 2019, 33(6): 065102 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190757

运动状态下聚能战斗部侵彻披挂反应装甲靶板的数值模拟

Numerical Simulation of Shaped Warhead Penetrating the Target with Reactive Armor in Motion State 高压物理学报. 2018, 32(2): 025107 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20170604

分体式侵彻体斜侵彻钢靶的弹道稳定性数值模拟

Numerical Simulation of Ballistic Stability of Split Penetrator Penetrating Steel Target 高压物理学报. 2020, 34(6): 065101 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20200563

分段PELE弹体冲击多层靶板数值分析

Numerical Analysis of Segmented PELE Penetrating Multi-layer Target 高压物理学报. 2018, 32(5): 054101 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180514

杆式钨合金弹超高速撞击薄靶的能量损耗

Energy Dissipation of Tungsten Alloys Cylindrical Rods Hypervelocity Impacting Thin Steel Target 高压物理学报. 2019, 33(6): 064106 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190732

超空泡射弹水下侵彻靶板三相耦合数值模拟

Three-Phase Coupling Numerical Simulation of Underwater Penetration of Supercavitating Projectile into Target Plate 高压物理学报. 2020, 34(1): 015103 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190798 DOI: 10.11858/gywlxb.20200506

小钨球对防弹衣加松木靶的侵彻研究

唐昌州¹, 智小琦¹, 徐锦波², 陈志斌²

(1. 中北大学机电工程学院,山西太原 030051;2. 晋西工业集团,山西太原 030027)

摘要:为获得小钨球对防弹衣加人体等效靶的侵彻性能,对小钨球侵彻 Ⅲ级软体防弹衣加 25 mm 厚红松靶进行了试验研究。在此基础上,结合小钨球侵彻 LY-12 硬铝靶试验与数值模 拟,研究了 LY-12 硬铝靶与 Ⅲ级软体防弹衣加 25 mm 厚红松靶之间的等效关系,并通过量纲分 析方法建立了小钨球侵彻 Ⅲ级软体防弹衣加 25 mm 厚红松靶的弹道极限预测公式,分析了小钨 球质量变化对其侵彻性能影响的规律。结果表明:对于小钨球的侵彻, Ⅲ级软体防弹衣加 25 mm 厚红松靶可等效为 6.2 mm 厚 LY-12 硬铝靶;弹道极限预测公式的预测值与试验值吻合良好,并 且随着钨球质量的增加,弹道极限近似服从幂函数递减规律。研究结果对单兵破片战斗部的改 进设计具有一定的参考价值。

关键词:小钨球;防弹衣;红松靶;数值模拟;等效靶;量纲分析;弹道极限 中图分类号:TJ012.4 文献标识码:A

大量研究数据表明,在现代战争中,70%以上的士兵伤亡是因破片和枪弹所致^[1]。自从单兵防护装备出现以后,随着防护装备材料的不断发展,防护能力的不断增强,士兵的伤亡率大大降低。为此,单兵武器对毁伤元提出了更高的要求。如何设计合适的毁伤元使其贯穿单兵防护装备后对人员造成严重伤害或致命伤害成为单兵破片战斗部设计的重点。

破片是主要的毁伤元,对于不同目标,破片质量要求不同。单兵破片战斗部对付的主要目标是人员,为提高单位面积的破片数量且保持良好的机动性,小质量钨合金破片是未来发展的主要方向之一。目前对带有软体防护装备的人体等效靶的侵彻研究,大多以标准枪弹为对象,如Liden等^[2]利用9mm子弹侵彻带有软防护的活体麻醉猪,研究了软防护后的非贯穿损伤,结果表明非贯穿子弹可对软防护后的胸膛造成严重伤害;Roberts^[3-4]、Merkle^[5]等建立了人体躯干的有限元模型,并模拟计算了9mm手枪弹侵彻带有软质防弹衣的拟人上身躯干,研究了人体内部器官在非贯穿损伤下的压力分布情况,研究结果为确定胸部对弹道冲击的反应提供了参考;Shen等^[6]通过试验和数值模拟研究了9mm子弹对带有软防护人体模拟靶的侵彻,并对撞击后 10~1000 μs内的侵彻过程进行了量化;罗少敏等^[7]利用数值模拟研究了7.62 mm 步枪弹侵彻带软硬复合防护明胶靶的侵彻过程及其机理;孙非^[8]、唐刘建^[9]等分别研究了带 UHMWPE 软防护明胶靶在 7.62 mm 和 9 mm 手枪弹侵彻作用下的动态响应特性;刘坤等^[10]研究了 9 mm 全铜弹和 5.8 mm 手枪弹对带软防护的明胶靶标的侵彻机理。而关于小尺寸破片对带有软体防护装备的人体等效靶的侵彻研究却鲜有报道。

本工作以国际标准 25 mm 厚红松木靶为人体等效靶, 对小钨球侵彻 Ⅲ级软体防弹衣加 25 mm 厚 红松靶展开试验研究; 为方便今后对防弹衣+人体等效靶侵彻进行研究, 作等效靶代换, 即利用数值模

^{*} 收稿日期: 2020-01-13; 修回日期: 2020-04-29

作者简介: 唐昌州(1996-),男,硕士研究生,主要从事弹药工程与毁伤技术研究. E-mail: 562870134@qq.com

通信作者: 智小琦(1963-), 女, 博士, 教授, 主要从事武器毁伤与装药技术研究. E-mail: zxq4060@sina.com

拟分析计算 LY-12 硬铝靶与Ⅲ级软体防弹衣加红松靶之间的等效关系,并依据量纲分析方法建立小钨 球侵彻Ⅲ级软体防弹衣加红松靶的弹道极限预测公式,以期为单兵破片战斗部的设计提供参考。

1 试验研究

1.1 试验布置

试验采用 12.7 mm 弹道枪加载小钨球,钨球置于尼龙弹托中,钨球质量为 0.21 g,直径为 2.8 mm。 发射时,钨球随弹托飞出,并在空气阻力作用下与弹托分离。靶板前有防护板,防护板上有比弹托小的 孔,弹托挡在防护板前面无法进入靶板。图 1 为试验所用的钨球及弹托。靶板分别为紧密贴合的 FDY3R-01型Ⅲ级防弹衣加 25 mm 厚红松木及 8 mm 厚 LY-12 硬铝靶。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,采用 0°/90°正交铺层结构。所有靶板均用专用夹具固定在靶架上。为 测量着靶前钨球速度及穿透靶后的剩余速度,靶前及靶后分别放置通断靶,测速装置采用南京理工大 学机械工程学院设计的 NLG202-Z 型六路测速仪,精度为 0.1 μs。试验布置示意图如图 2 所示。本次试 验中的侵彻均为正侵彻。



1.2 试验结果及分析

图 3 为试验后的防弹衣和红松木靶,图 4 给出了防弹衣纤维的典型损伤状态。防弹衣受到破片冲击时,冲击区域表面的纤维与树脂脱粘,并在破片剪切作用下产生剪切破坏,形成一个与破片直径近似的孔洞,如图 4(a) 所示。随着侵彻的进行,破片冲击产生的应力波沿纤维轴向 (如图 4(c) 所示) 及靶体纵向两个方向传播。在靶体纵向上,除了剪切破坏,纤维还会产生拉伸变形破坏,形成背部鼓包,如图 4(b)、图 4(d) 所示。这是由于在侵彻过程中破片部分动能会转化为纤维内能,主要是弹性势能^[11],宏



(a) Body armor

(b) Body armor core and pine target图 3 试验后的防弹衣和红松木

Fig. 3 Body armor and pine after the experiment



(a) Front



观表现为纤维的拉伸变形。在破片穿透防弹衣后,由于红松木材质较脆,屈服极限较低,松木靶仅在弹 孔附近发生剪切破坏,且弹孔直径与破片直径相近,如图 3(c) 所示。

图 5 为试验后 LY-12 硬铝靶状态图。由图 5 可知, LY-12 硬铝靶主要发生的是剪切破坏。当破片 高速撞击靶板时,靶板表面由于局部应力集中产生塑性变形,形成凹坑。随着破片侵彻的深入,靶板内 部材料发生较大塑性变形。并且由于局部畸变产生的热量来不及散出,塑性变形加剧,绝热剪切带逐 渐形成,铝靶在破片侵彻作用下发生剪切冲塞破坏。当破片着靶速度低于弹道极限时,靶板背面产生 与破片形状相同的局部隆起变形,并伴有径向裂纹生成,如图 5(d)所示。当破片着靶速度高于弹道极 限时, 靶板背面产生轻微的圆形延性冲寒破坏并形成圆形断口, 在断口周围存在轻微的径向裂纹, 如 图 5(b) 所示。



(a) Front of target (Penetration) (b) Back of target (Penetration) (c) Front of target (Embedment) (d) Back of target (Embedment) 图 5 试验后 LY-12 硬铝靶状态图

Fig. 5 States of LY-12 hard aluminum target after the experiment

利用 Recht 等[12] 提出的 R-I 公式处理钨球剩余速度与着靶速度关系以获得弹道极限,该公式为

$$v_{\rm r} = a \left(v_{\rm i}^p - v_{\rm bl}^p \right)^{1/p} \tag{1}$$

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_b为弹道极限, m/s; a、p为模型参数, 可利用试验 数据并通过最小二乘法拟合得到。

图 6 给出了钨球侵彻靶板的剩余速度-着靶速度曲线,表1给出了由式(1) 拟合得到的 R-I 模型 参数。

表 1 R-I 模型参数				
Table 1 R-I mo	odel parameters			
Target type	а	$v_{bl}/(m \cdot s^{-1})$	р	
Body armor + Pine composite target	0.73	692.9	2	
8 mm thick LY-12 hard aluminum target	0.77	850.1	2	

(d) Back (Embedment)



Fig. 6 Residual velocity-initial velocity curves of tungsten spheres penetrating targets

2 数值模拟研究

由于 LY-12 硬铝合金在兵器、航空等领域应用较广,尤其在近年来开展的战斗损伤研究中,大都 将各类材料等效为 LY-12 硬铝合金来研究装备的损伤情况^[13-16]。为方便以后对防弹衣+人体等效靶的 侵彻研究,作等效靶代换。本研究将利用数值模拟分析在小钨球侵彻作用下 LY-12 硬铝靶与防弹 衣+红松木复合靶之间的等效关系,

2.1 仿真模型及其参数

采用 TrueGrid 软件进行建模与网格划分,考虑到模型的对称性,为节约计算时间,模型简化为 1/4 模型。钨球尺寸及靶板厚度与试验状态一致,靶板采用圆形靶,半径取为钨球直径的11倍,以尽量

减小边界效应对侵彻过程的影响。为保证计算的 连续性与高精度,网格采用渐进式。弹靶相互作 用的主要区域加密,密集区网格尺寸控制 在0.10~0.15 mm;其余区域采用稀疏网格,网格尺 寸控制在 0.15~0.90 mm;钨球最小网格尺寸为 0.01 mm。有限元模型如图 7 所示。

数值模拟采用 LSDYNA-3D 软件,单位制为 cm-g-µs,算法采用 Lagrange 算法。根据结构的对





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。

钨球和 LY-12 硬铝靶均采用塑性随动硬化材料模型 (MAT_PLASTIC_KINEMATIC)。由于 LY-12 硬铝合金为应变率不敏感材料^[17],故不考虑其应变率效应。参考文献 [18–19] 并根据实际试验结果对 模型参数进行微调,弹靶材料模型参数如表 2 所示,其中:ρ为密度,E 为杨氏模量,μ为泊松比,SIGY 为 屈服应力,ETAN 为切线模量,SRC、SRP 为应变率参数,FS 为失效应变。

Table 2 Material model parameters of projectile and target								
Material	$ ho/(g \cdot cm^{-3})$	E/GPa	μ	SIGY/MPa	ETAN/MPa	SRC	SRP	FS
Tungsten alloy	18.1	367	0.303	1 506	792	3.9	6	1.2
LY-12 hard aluminum	2.78	71	0.3	375	1 000	0	0	0.8

表 2 弹靶材料模型参数 Fable 2 Material model parameters of projectile and target

2.2 仿真模型的验证

利用试验数据对仿真模型进行验证,验证结果如图 8 所示。通过 R-I 公式处理仿真得到的剩余速度与着靶速度的关系可得:钨球侵彻 8 mm 厚 LY-12 硬铝靶的弹道极限为 854.4 m/s,与试验 所得的弹道极限的相对误差为 0.5%。可见,该模型的仿真结果与试验结果接近,即仿真模型及其参数具有可靠性。

2.3 等效靶板厚度的确定

根据能量等效原则^[20], 钨球以 692.9 m/s 的速 度侵彻不同厚度的 LY-12 硬铝靶, 其仿真结果如 表 3 所示。



experimental results

表 3 钨球侵彻不同厚度 LY-12 硬铝靶的仿真结果	
-----------------------------	--

Table 3 Simulation results of tungsten sphere penetrating LY-12 hard aluminum target with different thicknesses

Initial velocity/ $(m \cdot s^{-1})$	Thickness of target/mm	Residual velocity/(m·s ⁻¹)	Penetration result
	6.10	63.0	Penetration
	6.20	21.4	Penetration
692.9	6.21	0	Embedment
	6.25	0	Embedment
	6.30	0	Embedment

由表 3 可知, 当着靶速度为 692.9 m/s 时, 0.21 g 的钨球能穿透 6.20 mm 厚 LY-12 硬铝靶 (剩余速度 为 21.4 m/s, 剩余动能仅为 0.05 J), 而不能穿透 6.21 mm 厚的 LY-12 硬铝靶。综合考虑靶板的实际做工 精度, 可认为 6.2 mm 是该钨球以 692.9 m/s 的速度侵彻 LY-12 硬铝靶的极限穿透厚度, 即防弹衣+红松 木复合靶可等效为 6.2 mm 厚 LY-12 硬铝靶。

2.4 等效靶板厚度的验证

利用 0.21 g、直径 2.8 mm 以及 0.17 g、直径 2.6 mm 两种钨球对等效 6.2 mm 厚 LY-12 硬铝靶进行弹 道极限对比试验,试验对比结果如表 4 所示。由表 4 可知,钨球侵彻防弹衣+红松木复合靶与侵彻 6.2 mm 厚 LY-12 硬铝靶弹道极限的相对误差小于 5%,等效靶与原型靶抗破片侵彻能力相当,即对于小钨球的 侵彻,防弹衣+红松木复合靶可等效为 6.2 mm 厚 LY-12 硬铝靶。不过,由于研究的钨球质量有限,等效 靶板仅适用于质量较小的钨球,而对大质量钨球的适用性有待进一步研究。

表 4	钨球侵彻原型靶与等效靶弹道极限的对比

Table 4	Comparison of ballistic	limits between tungste	n spheres penetrati	ing prototype target	and the equivalent target
---------	-------------------------	------------------------	---------------------	----------------------	---------------------------

Type of tungsten sphere	Target type	Ballistic limit/($m \cdot s^{-1}$)	Relative error/%
$0.21 \text{a} \alpha^{2.9} \text{mm}$	Body armor + Pine composite target	692.9	1.0
0.21 g, Ø2.8 mm	6.2 mm thick LY-12 hard aluminum target	705.2	1.8
0.17 a. 62.6 mm	Body armor + Pine composite target	742.3	2.2
0.17 g, Ø2.6 mm	6.2 mm thick LY-12 hard aluminum target	758.7	2.2

3 量纲分析

由于防弹衣和红松木材料结构复杂,很难用现有的数学模型去描述钨球侵彻防弹衣+红松木复合 靶的过程及现象。而对于这类复杂问题,量纲分析法能避开复杂的内部因素变化过程从而建立物理现 象基本关系^[21]。因此,为进一步研究钨球质量变 化对其侵彻防弹衣+红松木复合靶侵彻性能的影 响,本研究依据量纲分析建立小钨球侵彻防弹 衣+红松木复合靶的弹道极限预测公式。

通过理论分析,确定钨球侵彻防弹衣+红松木 复合靶弹道极限的主要物理量如表5所示^[22]。

可见,弹道极限vb是关于这些物理量的函数

$$v_{\rm bl} = f(\rho_{\rm p}, D_{\rm p}, E_{\rm p}, \sigma_{\rm sp}, \varepsilon_{\rm p}, C_{\rm p}, \rho_{\rm f}, h_{\rm f}, E_{\rm f}, \sigma_{\rm sf}, \sigma_{\tau \rm f}, \sigma_{\rm ff}, \varepsilon_{\rm f}, C_{\rm f}, \rho_{\rm s}, h_{\rm s}, E_{\rm s}, \sigma_{\rm ss}, \varepsilon_{\rm s}, C_{\rm s})$$
(2)

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

$$\begin{split} \Pi &= \frac{v_{\text{bl}}}{\sqrt{\sigma_{\text{sp}}/\rho_{\text{p}}}}, \ \Pi_{1} = \frac{E_{\text{p}}}{\sigma_{\text{sp}}}, \ \Pi_{2} = \varepsilon_{\text{p}}, \\ \Pi_{3} &= \frac{C_{\text{p}}}{\sqrt{\sigma_{\text{sp}}/\rho_{\text{p}}}}, \ \Pi_{4} = \frac{\rho_{\text{f}}}{\rho_{\text{p}}}, \ \Pi_{5} = \frac{h_{\text{f}}}{D_{\text{p}}}, \\ \Pi_{6} &= \frac{E_{\text{f}}}{\sigma_{\text{sp}}}, \ \Pi_{7} = \frac{\sigma_{\text{sf}}}{\sigma_{\text{sp}}}, \ \Pi_{8} = \frac{\sigma_{\text{rf}}}{\sigma_{\text{sp}}}, \ \Pi_{9} = \frac{\sigma_{\text{ff}}}{\sigma_{\text{sp}}}, \\ \Pi_{10} &= \varepsilon_{\text{f}}, \ \Pi_{11} = \frac{C_{\text{f}}}{\sqrt{\sigma_{\text{sp}}/\rho_{\text{p}}}}, \\ \Pi_{12} &= \frac{\rho_{\text{s}}}{\rho_{\text{p}}}, \ \Pi_{13} = \frac{h_{\text{s}}}{D_{\text{p}}}, \ \Pi_{14} = \frac{E_{\text{s}}}{\sigma_{\text{sp}}}, \ \Pi_{15} = \frac{\sigma_{\text{ss}}}{\sigma_{\text{sp}}}, \\ \Pi_{16} &= \varepsilon_{\text{s}}, \ \Pi_{17} = \frac{C_{\text{s}}}{\sqrt{\sigma_{\text{sp}}/\rho_{\text{sp}}}} \end{split}$$

根据∏定理,式(2)可写为

$$\Pi = \frac{v_{\rm bl}}{\sqrt{\sigma_{\rm sp}/\rho_{\rm p}}} = f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{17})$$
(3)

 $\sqrt{\sigma_{\rm sp}/\rho_{\rm p}}$

表	5	确定弹道极限的主要物理量
Table 5	Ma	in physical quantities for determining

ballistic limit

	-
Physical quantity	Dimension
Density $\rho_{\rm p}/({\rm kg}\cdot{\rm m}^{-3})$	ML^{-3}
Diameter D _p /Pa	L
Elastic modulus E_p /Pa	$L^{-1}MT^{-2}$
Yield strength $\sigma_{\rm sp}$ /Pa	$L^{-1}MT^{-2}$
Characteristic strain $\varepsilon_{\rm p}$	1
Sound velocity $C_p/(\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	LT^{-1}
Density $\rho_{\rm f}/({\rm kg}\cdot{\rm m}^{-3})$	ML ⁻³
Thickness $h_{\rm f}/{ m m}$	L
Elastic modulus $E_{\rm f}$ /Pa	$L^{-1}MT^{-2}$
Compressive strength $\sigma_{\rm sf}/{\rm Pa}$	$L^{-1}MT^{-2}$
Shear strength $\sigma_{\tau_{\rm f}}/{ m Pa}$	$L^{-1}MT^{-2}$
Tensile strength $\sigma_{\rm ff}/{\rm Pa}$	$L^{-1}MT^{-2}$
Characteristic strain $\varepsilon_{\rm f}$	1
Sound velocity $C_{\rm f}/({\rm m}\cdot{\rm s}^{-1})$	LT^{-1}
Density $\rho_{\rm s}/(\rm kg\cdot m^{-3})$	ML ⁻³
Thickness $h_{\rm s}/{\rm m}$	L
Elastic modulus E_s /Pa	$L^{-1}MT^{-2}$
Failure stress $\sigma_{\rm ss}$ /Pa	$L^{-1}MT^{-2}$
Characteristic strain $\varepsilon_{\rm s}$	1
Sound velocity $C_s/(\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	LT ⁻¹
	Physical quantity Density $\rho_p/(kg \cdot m^{-3})$ Diameter D_p/Pa Elastic modulus E_p/Pa Yield strength σ_{sp}/Pa Characteristic strain ε_p Sound velocity $C_p/(m \cdot s^{-1})$ Density $\rho_f/(kg \cdot m^{-3})$ Thickness h_f/m Elastic modulus E_f/Pa Compressive strength σ_{sf}/Pa Shear strength σ_{rf}/Pa Tensile strength σ_{ff}/Pa Characteristic strain ε_f Sound velocity $C_f/(m \cdot s^{-1})$ Density $\rho_s/(kg \cdot m^{-3})$ Thickness h_s/m Elastic modulus E_s/Pa Failure stress σ_{ss}/Pa Characteristic strain ε_s Sound velocity $C_s/(m \cdot s^{-1})$

在钨球、防弹衣和红松木材料不变的条件下,除了Π、Π₃和Π₁₃外,其余导出量均为常数,因此式(3) 可简化为

$$\Pi = \frac{v_{\rm bl}}{\sqrt{\sigma_{\rm sp}/\rho_{\rm p}}} = f\left(\frac{h_{\rm f}}{D_{\rm p}}, \frac{h_{\rm s}}{D_{\rm p}}\right) = c_0 \left(\frac{h_{\rm f}}{D_{\rm p}}\right)^{\alpha} \left(\frac{h_{\rm s}}{D_{\rm p}}\right)^{\beta} = c_0 (h_{\rm f})^{\alpha} (h_{\rm s})^{\beta} \left(\frac{1}{D_{\rm p}}\right)^{\alpha+\beta}$$
(4)

式中: c₀、α、β为待定常数。

由于本试验中的防弹衣和红松木厚度不变, 令 $c_1 = c_0(h_f)^{\alpha}(h_s)^{\beta}$, $\gamma = \alpha + \beta$, 则式 (4) 为

$$\Pi = \frac{v_{\rm bl}}{\sqrt{\sigma_{\rm sp}/\rho_{\rm p}}} = c_1 \left(\frac{1}{D_{\rm p}}\right)^{\gamma} \tag{5}$$

式中:c1、y为待定常数。

由上述分析可知,在防弹衣和红松木材料及其厚度不变的情况下,对于不同材料的钨球,均满足

$$\frac{v_{\text{bl},i}}{\sqrt{\sigma_{\text{sp},i}/\rho_{\text{p},i}}} = c_i \left(\frac{1}{D_{\text{p},i}}\right)^{\gamma_i} \qquad i = 0, 1, 2, \dots, n$$
(6)

式中:ci、yi为待定常数。

为预测不同材料的不同尺寸钨球侵彻防弹衣+红松木复合靶的弹道极限,令

$$\frac{v_{\rm bl}}{\sqrt{\sigma_{\rm sp}/\rho_{\rm p}}} = m \left(\frac{1}{D_{\rm p}}\right)^n \tag{7}$$

式中:m、n为待定常数。

为便于求解,将式(7)两端同时取对数

$$\ln \frac{v_{\rm bl}}{\sqrt{\sigma_{\rm sp}/\rho_{\rm p}}} = \ln m + n \ln \frac{1}{D_{\rm p}} \tag{8}$$

令
$$y = \ln \frac{v_{bl}}{\sqrt{\sigma_{sp}/\rho_p}}, x = \ln \frac{1}{D_p}, k = \ln m, 则式 (8) 变换为$$

 $y = nx + k$ (9)

由于试验所用钨球材料性能近似,因此σ_{sp}均可取 1.506 GPa。利用试验数据对式 (9) 进行一元线性 回归拟合,可得

$$n = 0.932, \quad k = -8.059$$
 (10)

将n、k回代至式(9),有

$$\frac{v_{\rm bl}}{\sqrt{\sigma_{\rm sp}/\rho_{\rm p}}} = e^{-8.059} \left(\frac{1}{D_{\rm p}}\right)^{0.932}$$
(11)

为验证式 (11) 的有效性,利用数值模拟和式 (11) 分别计算不同质量钨球侵彻的弹道极限,结果如表 6 所示。由表 6 可知,钨球侵彻防弹衣+红松木复合靶的预测结果与侵彻等效 6.2 mm 厚 LY-12 硬铝 靶的仿真结果比较吻合。定量地来看,当钨球质量小于 0.46 g 时,预测结果与仿真结果的最大相对误 差小于 5%,因此利用式 (11) 预测小钨球侵彻防弹衣+红松木复合靶的弹道极限具有较高的可信度。

Mana Citara da Maria	Discussion of a state of the state	Ballistic limit/ $(m \cdot s^{-1})$		D 1 (; /0/	
Mass of tungsten sphere/g	Diameter of tungsten sphere/mm	Calculated	Simulated	- Relative error/%	
0.26	3.02	643.8	649	-0.8	
0.31	3.20	609.9	623	-2.1	
0.36	3.36	582.8	599	-2.8	
0.41	3.52	558.1	580	-3.9	
0.46	3.64	540.9	561	-3.7	

表 6 不同方法计算的弹道极限的比较 Table 6 Comparison of ballistic limits calculated by different methods

为进一步验证式 (11) 的可靠性,对 0.20 g、直径 2.8 mm 的钨球侵彻防弹衣+红松木复合靶进行了侵 彻试验。表 7 对比了 0.20 g 钨球侵彻防弹衣+红松木复合靶的弹道极限试验值和计算值。由表 7 可知, 0.20 g 钨球侵彻防弹衣+红松木复合靶弹道极限的试验值和计算值相对误差不超过 5%,满足工程应用 要求。故式 (11) 可用于预测小钨球侵彻防弹衣+红松木复合靶的弹道极限,适用范围为:钨球质量小于

表 7 0.20g 钨球侵彻防弹衣+红松木复合靶的弹道极限的试验值与计算值的对比

 Table 7
 Comparison between experimental and calculated values of ballistic limits of tungsten spheres with mass of 0.20 g penetrating body armor and pine composite target

Type of tungsten sphere	Ballistic lin	$nit/(m \cdot s^{-1})$	Dalativa arran/0/
	Experimental value	Calculated value	- Kelalive ellol/%
0.20 g, Ø2.8 mm	709.4	702.5	-1.0

0.46 g。同时,由式(11)可以看出,随着钨球直径的增加,其质量增加,弹道极限近似服从幂函数递减规律。

4 结 论

(1) 0.21 g 直径 2.8 mm、0.20 g 直径 2.8 mm 以及 0.17 g 直径 2.6 mm 的小钨球侵彻 Ⅲ 级软体防弹衣 加 25 mm 厚红松靶的弹道极限分别为 692.9、709.4、742.3 m/s; 0.21 g 直径 2.8 mm 及 0.17 g 直径 2.6 mm 的小钨球侵彻 6.2 mm 厚 LY-12 硬铝靶的弹道极限分别为 705.2、758.7 m/s; 0.21 g 直径 2.8 mm 的小钨球侵彻 8.0 mm 厚 LY-12 硬铝靶的弹道极限为 850.1 m/s。

(2)为方便今后研究,根据能量守恒原则建立了Ⅲ级软体防弹衣加 25 mm 厚红松靶与 LY-12 硬铝 靶的等效关系,即前者可等效为 6.2 mm 厚 LY-12 硬铝靶;利用量纲分析建立了小钨球侵彻Ⅲ级软体防 弹衣加 25 mm 厚红松靶的弹道极限预测公式,预测值与试验值吻合良好。

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.
 CHEN K. Numerical simulation research of small arms lethal-element penetrating gelatin target [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012: 1-2.
- [2] LIDEN 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(Supplement): S145–S148.
- [3] 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 and Acute Care Surgery, 2005, 58: 1241–1251.
- [4] ROBERTS J C, MERKLE A C, BIERMANN P J, et al. Computational and experimental models of the human torso for nonpenetrating ballistic impact [J]. Journal of Biomechanics, 2007, 40(1): 125–136.
- [5] 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.
- [6] SHEN W, NIU Y, BYKANOVA L, et al. Characterizing the interaction among bullet, body armor, and human and surrogate targets [J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2010, 132(12): 121001.
- [7] 罗少敏, 徐诚, 陈爱军, 等. 步枪弹侵彻带软硬复合防护明胶靶标的数值模拟 [J]. 兵工学报, 2014, 35(8): 1172–1178.
 LUO S M, XU C, CHEN A J, et al. Numerical simulation of bullets penetrating into gelatin target with hard/soft composite armor [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(8): 1172–1178.
- [8] 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.
 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.
 [9] 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): 250–254.
- 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): 250–254.
- [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.
 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.
- [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.
 HUANG G W. Numerical simulation research of projectile impacting gelatin target with fiber armor [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013: 41–43.
- [12] RECHT R F, IPSON T W. Ballistic perforation dynamics [J]. Journal of Applied Mechanics, 1963, 30(3): 384-390.
- [13] 米双山, 张锡恩, 陶贵明. 钨球侵彻 LY-12 铝合金靶板的有限元分析 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(5): 477-480.
 MI S S, ZHANG X E, TAO G M. Finite element analysis of spherical fragments penetrating LY-12 aluminum alloy target [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(5): 477-480.
- [14] 曹兵. 不同材质靶板抗破片侵彻等效关系实验研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2006(4): 113–114.
 CAO B. An experimental investigation on the equivalent relation between different armour plates penetrated by fragments [J].

Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006(4): 113-114.

- [15] 曹兵. 靶板等效方法研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2003(Suppl 4): 122-123.
 CAO B. Study on equivalent target experimental methods [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2003(Suppl 4): 122-123.
- [16] 李学林, 项鑫, 黄广炎, 等. 钨球破片对相控阵雷达典型部件的侵彻特性研究 [J]. 兵工学报, 2010(Supp 1): 51–54. LI X L, XIANG X, HUANG G Y, et al. Penetration characteristics of tungsten sphere fragment to typical components of phased array radar [J]. Acta Armamentarii, 2010(Supp 1): 51–54.
- [17] 宫能平. LY12CZ 铝合金棒料的拉伸实验研究 [J]. 淮南工业学院学报, 2002(1): 62–65.
 GONG N P. Tensile mechanics property of aluminium LY12CZ under different strain rates [J]. Journal of Huainan Institute of Technology, 2002(1): 62–65.
- [18] 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): 157–165.
 WANG X, ZHI X Q, XU J B, et al. Dimensional analysis of ballistic limit of fragments penetrating multi-layer plate [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(6): 157–165.
- [19] 朱耀, 庞宝君, 盖秉政. 一种用于动态拉伸试验装置的新型试件装卡方式 [J]. 实验力学, 2009(5): 55–60.
 ZHU Y, PANG B J, GAI B Z. A new specimen fastener for dynamic tensile testing apparatus [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009(5): 55–60.
- [20] 米双山,何剑彬,张锡恩,等. 战斗损伤仿真中的等效靶与破片终点速度研究 [J]. 兵工学报, 2005(5): 605–608.
 MI S S, HE J B, ZHANG X E, et al. Equivalent target and terminal velocity of fragments in battle damage simulation [J]. Acta Armamentarii, 2005(5): 605–608.
- [21] 谈庆明. 量纲分析 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2005: 1-2. TAN Q M. Dimensional analysis [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2005: 1-2.
- [22] 毛亮, 王华, 姜春兰, 等. 钨合金球形破片侵彻陶瓷/DFRP 复合靶的弹道极限速度 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(13): 1–5.
 MAO L, WANG H, JIANG C L, et al. Ballistic limit velocity of tungsten alloy spherical fragment penetrating ceramic/DFRP composite target plates [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(13): 1–5.

Research on Small Tungsten Spheres Penetrating into Pine Target with Body Armor

TANG Changzhou¹, ZHI Xiaoqi¹, XU Jinbo², CHEN Zhibin²

(1. College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;
 2. Jinxi Industrial Group, Taiyuan 030027, Shanxi, China)

Abstract: In order to study the penetration performance of small tungsten spheres on the human equivalent target with body armor, the test of small tungsten spheres penetrating 25 mm thick pine target with Class III soft body armor is carried out. On this basis, the equivalent relationships between 25 mm thick pine target with Class III soft body armor and LY-12 hard aluminum target are studied by combining the experiment and numerical simulation of small tungsten spheres penetrating LY-12 hard aluminum target. According to the method of dimensional analysis, the ballistic limit prediction formula of small tungsten spheres penetrating 25 mm thick pine target with Class III soft body armor is established and the influence of the mass change of small tungsten spheres on the penetration performance is studied. The experimental results reveal that for the penetration of small tungsten spheres, a 25 mm thick pine target with Class III soft body armor can be equivalent to a 6.2 mm thick LY-12 hard aluminum target. The predicted value of ballistic limit prediction formula is in good agreement with the test value. And with the increase of the mass of tungsten spheres, the ballistic limit approximately obeys the law of decreasing power function. The research results have certain reference value for the improvement and design of individual fragment warhead.

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