DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0711-06

高速侵彻弹体层合木靶脱壳*

申 超,皮爱国,刘 柳,刘坚成,黄风雷
(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要:利用实验和数值模拟方法研究一种利用层合松木靶作为脱壳装置的机械式脱壳方法。首先讨论了一种正交各向异性材料模型用于高速侵彻木材的可行性及其参数变化规律,结合美军的高速侵彻实验数据对数值模拟方案进行了验证与确认。在此基础上,讨论了不同弹靶作用下含弹托弹体对松木靶的侵彻/贯穿规律。数值模拟与实验研究结果表明:在垂直入射条件下,通过合理的层合木靶设计可对次口径发射弹体有效脱壳,高速侵彻弹体可垂直入射靶板,弹体速度衰减可控;在初始攻角入射条件下,层合靶将使高速侵彻弹体攻角放大。随入射速度增加,弹体贯穿层合木靶消耗动能增加,体现了木材具有明显的应变率增强效应。

关键词:爆炸力学;脱壳;正交各向异性材料模型;高速侵彻;弹体;层合松木靶
中图分类号:O385 **国标学科代码**:1303530 **文献标志码**:A

高速侵彻是当前国防领域的热点问题,因其机理复杂性,实验研究是获得相关数据最重要的研究手段。受发射平台及实验成本的限制,目前一般基于火炮开展小尺度缩比、基于平衡炮开展中等尺度缩比或原型实验研究。根据平衡炮内弹道特性,发射次口径侵彻弹时需要设计发射弹托组件,其基本要求是保证膛内的结构稳定和发射出膛后的飞行弹道稳定,弹托组件对次口径弹体侵彻结果没有大的干扰。因此,为获得精确的实验结果,此类实验中弹体应脱壳。早期的脱壳技术[1-2]一般用于尾翼稳定次口径脱壳穿甲弹实验研究,通常采用三瓣式气动分离弹托。与长杆脱壳穿甲弹不同的是,动能侵彻武器含有装药结构,在膛射条件下需考虑弹体与火药室的气闭隔离,往往在弹体尾部设置一块一定厚度、较大质量的金属底托,在参考脱壳穿甲弹的气动分离式弹托设计时,底托很难被可控分离,且容易对动能弹体的飞行姿态造成扰动从而带来初始攻角,甚至对着靶后的弹体尾部造成二次撞击,导致实验失败。

C. Doolittle 等[3]利用层合松木靶作为脱壳装置,对约 850 m/s 高速发射的次口径弹体的弹托组件实现机械式脱壳,获得了理想的高速侵彻实验结果。本文中,将利用有限元的数值模型,模拟正交各向异性材料模型用于高速侵彻木材的可行性及其参数化规律,结合高速侵彻实验数据对数值模拟方案进行验证与确认,进而研究不同弹靶作用下含弹托弹体对松木靶的侵彻/贯穿规律。结合数值模拟与实验研究,探讨该机械式脱壳方法用于高速侵彻实验的参数可设计性、可控性,以期为同类型高速侵彻实验方案设计提供参考。

1 木靶材料正交各向异性本构模型及其单单元属性模拟

1.1 木靶材料正交各向异性本构模型

根据正交各向异性材料的定义,通过材料的任意一点都存在 3 个相互垂直的对称面,垂直于对称面的方向称为弹性主方向。结合层合松木靶板材料物理特性,可将其视作正交各向异性材料。其本构关系可以用 9 个相互独立的变量表征,即 E_{11}、E_{22}、E_{33}、G_{12}、G_{13}、G_{23}、υ_{12}、υ_{13}、υ_{23},其中 E 为杨氏模量,G 为剪切模量,υ 为泊松比:

* **收稿日期**:2014-03-21;**修回日期**:2014-08-13
基金项目:国家自然科学基金项目(11202029)
第一作者:申 超(1989—),男,硕士研究生;**通讯作者**:皮爱国,aiguo_pi@bit.edu.cn。

$$\begin{bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{33}\\ \sigma_{12}\\ \sigma_{23}\\ \sigma_{13}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0\\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0\\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 2C_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2C_{55} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2C_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ \varepsilon_{12}\\ \varepsilon_{23}\\ \varepsilon_{13}\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：$C_{11}=E_{11}(1-\upsilon_{23}\upsilon_{32})/\Delta$，$C_{22}=E_{22}(1-\upsilon_{31}\upsilon_{13})/\Delta$，$C_{33}=E_{33}(1-\upsilon_{12}\upsilon_{21})/\Delta$，$C_{13}=(\upsilon_{31}+\upsilon_{21}\upsilon_{32})E_{11}/\Delta$，$C_{12}=(\upsilon_{21}+\upsilon_{31}\upsilon_{23})E_{11}/\Delta$，$C_{23}=(\upsilon_{32}+\upsilon_{12}\upsilon_{31})E_{22}/\Delta$，$C_{44}=G_{12}$，$C_{55}=G_{23}$，$C_{66}=G_{13}$，$\Delta=1-\upsilon_{12}\upsilon_{21}-\upsilon_{23}\upsilon_{32}-\upsilon_{31}\upsilon_{13}-2\upsilon_{21}\upsilon_{32}\upsilon_{13}$。与之相关的木材弹性参数可由静力实验测试获得。

1.2 木靶材料的应变率增强效应

众多研究表明[4-6]，木靶材料具有明显的应变率增强效应。如 S. R. Reid 等[4]的霍普金森杆实验给出了木材在不同撞击速度下的应力-应变关系，更直观地描述了从平行纹理和垂直纹理方向对木材拉压实验的效果。图 1 给出了基于木材应变率增强效应 Hopkinson 压杆实验结果和理论模型计算曲线，其中利用 Shock 理论在平行和垂直于纹理方向上的趋势拟合公式分别为：

$$s_{\mathrm{r,p}}=1+\frac{\rho_{\mathrm{s}}\,v_0^2}{150\left(1-\alpha\dfrac{\rho}{\rho_{\mathrm{s}}}\right)}$$

$$s_{\mathrm{r,v}}=1+\frac{\rho_{\mathrm{s}}\,v_0^2}{70\dfrac{\rho}{\rho_{\mathrm{s}}}\left(1-\alpha\dfrac{\rho}{\rho_{\mathrm{s}}}\right)}$$

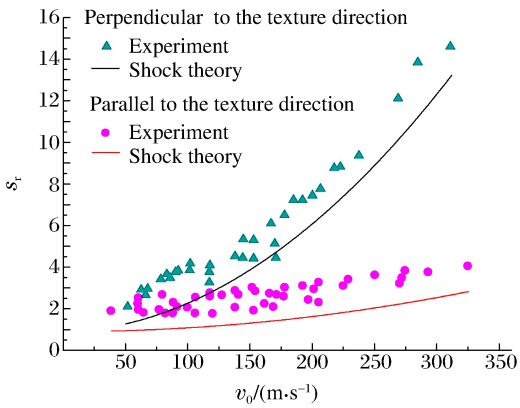

图 1 木材的应变率增强效应实验结果与理论模型结果的比较[4]

Fig. 1 Strain-rate strengthening effect of wood obtained by experiment and theoretical model[4]

式中：$s_{\mathrm{r,p}}$为平行于纹理方向上的应力增强因子，$s_{\mathrm{r,v}}$为垂直于纹理方向上的应力增强因子，ρ_{s}为木材固相密度，ρ为木材平均密度，α为形状系数，v_0为撞击速度。图 1 表明，随撞击速度的提高，强度和硬化均随应变率效应增强。在垂直纹理方向，木材表现出比平行纹理方向更大的应力增强现象。

1.3 屈服准则

对于正交各项异性材料在平行和垂直纹理方向运用不同的屈服准则，可以用木材样品的单轴拉压和纯剪切实验中获得的 6 个主要参量来表征：X_{t}，平行于纹理方向的拉伸强度；X_{c}，平行于纹理方向的压缩强度；Y_{t}，垂直于纹理方向的拉伸强度；Y_{c}，垂直于纹理方向的压缩强度；$S_{\parallel}$，平行于纹理方向的剪切强度；$S_{\perp}$，垂直于纹理方向的剪切强度。

平行纹理方向定义失效函数 $f_{\parallel}$，当 $f_{\parallel}\geqslant 0$ 时，发生失效：

$$f_{\parallel}=\frac{\sigma_{11}^2}{X^2}+\frac{\sigma_{12}^2+\sigma_{13}^2}{S_{\parallel}^2}-1,\qquad X=\begin{cases}X_{\mathrm{t}} & \sigma_{11}>0\\ X_{\mathrm{c}} & \sigma_{11}<0\end{cases} \tag{2}$$

垂直纹理方向定义失效函数 $f_{\perp}$，当 $f_{\perp}\geqslant 0$ 时，发生失效：

$$f_{\perp}=\frac{(\sigma_{22}+\sigma_{33})^2}{Y^2}+\frac{\sigma_{23}^2-\sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{\perp}^2}-1,\qquad Y=\begin{cases}Y_{\mathrm{t}} & \sigma_{22}+\sigma_{33}>0\\ Y_{\mathrm{c}} & \sigma_{22}+\sigma_{33}<0\end{cases} \tag{3}$$

1.4 木靶材料单单元属性模拟

为研究木靶材料的材料属性和其本构关系，利用 LS-DYNA 软件对木材的单个六面体八节点等参单元进行数值模拟。考虑木材在垂直于纹理和平行于纹理方向上力学性能的差异性，分别选取对木材的单个单元分垂直于纹理和平行于纹理 2 个方向进行压缩和拉伸。

文献[7]中给出了不同含水量、不同温度条件下典型松木的力学参数，不失一般性，本文中给出了室

温下含水质量分数 30%的松木的参数：平行于纹理方向的弹性模量 $E_l=11.35$ GPa，垂直于纹理方向的弹性模量 $E_t=246.8$ MPa，$X_t=85.2$ MPa，$X_c=21.2$ MPa，$Y_t=2.05$ MPa，$Y_c=4.08$ MPa，平行纹理方向的拉伸断裂能 $G_{f,\parallel}=42.66$ MPa，垂直于纹理方向的拉伸断裂能 $G_{f,\perp}=0.4$ MPa。将模拟范围限制在单轴拉伸/压缩下的单一单元，得到了预期结果，验证了参数传递的准确性，木材的响应体现了脆性破坏前的线弹性响应特征。数值模拟得到的含水质量分数 30%的木材的应力应变关系如图 2 所示。

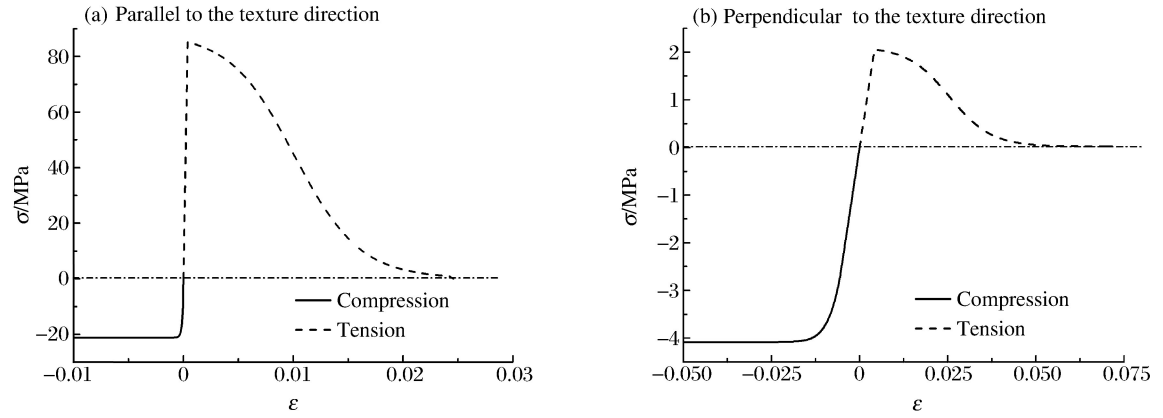

图 2　数值模拟得到的含水质量分数 30%的木材的应力应变关系

Fig. 2　Stress-strain relationships obtained by numerical simulation for the wood with the water mass fraction of 30%

2　含弹托弹体对松木靶的高速侵彻/贯穿规律数值模拟

2.1　数值模拟方案的验证与确认

基于靶场实验结果对数值模拟方案进行模型验证与确认是一条重要的技术途径。文献[3]给出了利用层合松木靶作为脱壳装置的高速侵彻实验结果，实验中战斗部质量为 79.19 kg，弹托质量为 31.1 kg，木靶尺寸为 1 m×1 m×1 m，壳体壁厚为 27.2 mm；弹体长度为 1 056 mm，直径为 132 mm，弧形头部系数(即弹头轮廓母线的曲率半径和弹径之比)为 2.5。

将文献[3]提供的侵彻体脱壳过程的速度历史曲线及过载历史曲线实验结果数字化，并结合下文中给出的阻力模型计算结果与本文数值模拟结果对比，如图 3 所示，速度 v 衰减曲线及过载 a 曲线具有良好的一致性。这说明本文建立的数值模拟方案可用于后续高速侵彻弹体贯穿层合木靶数值模拟研究。

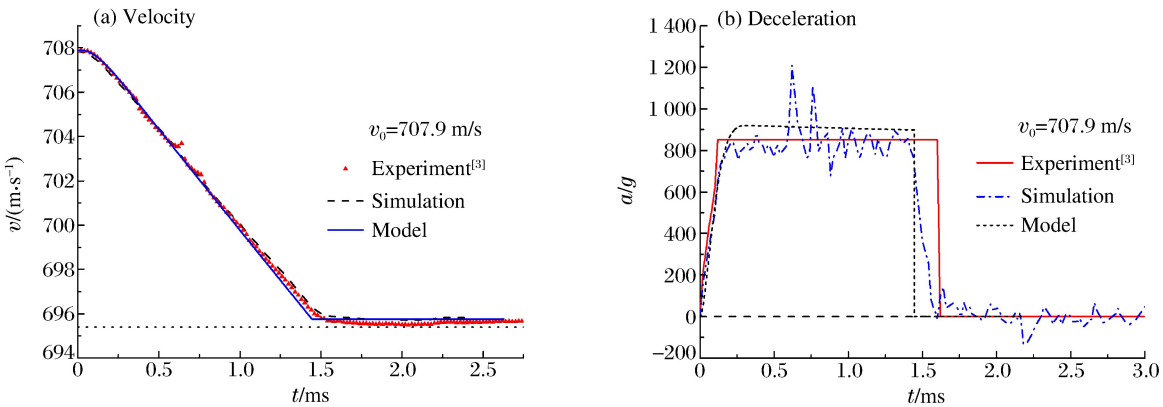

图 3　在模拟与实验速度衰减和过载历史对比

Fig. 3　Experimental velocity and deceleration histories compared with ones by numerical simulation

2.2　高速弹体正侵彻层合木靶的数值模拟与阻力模型

在上述针对文献实验的数值模拟方案的基础上，对弹体以 700.0、707.9、825.7、850.0、1 000.0、1 100.0 m/s等 6 种不同初速度，正侵彻/贯穿 1 m 厚层合松木靶的过程进行数值模拟。数值模拟表明，

随侵彻着速增加，弹体贯穿同等厚度层合木靶所消耗动能增加，体现了该材料的应变率增强效应。贯穿过程中，弹体能量损失 ΔE 与着速 v_0 的关系具有良好的线性规律，如图 4 所示。

不同着速下的侵彻体过载对比曲线如图 5 所示，观察可知弹体高速贯穿层合木靶的阻力形式及弹体减加速度具有明显的两段式特征：脉冲上升区、平台区，贯穿后阻力消失，过载归零。

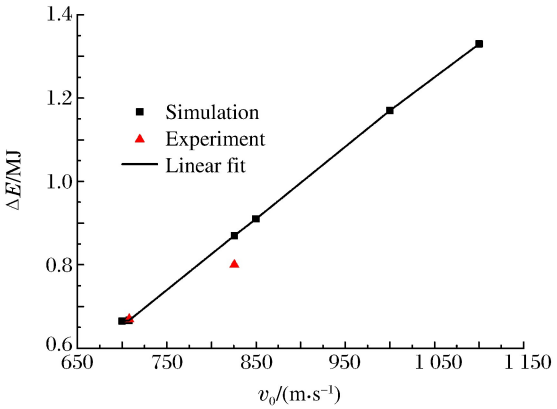

图 4 不同着速弹丸贯穿同一厚度层合木靶的动能损失

Fig. 4 The kinetic energy loss of the projectiles with different impact velocities penetrating into the laminated wood targets with the same thickness

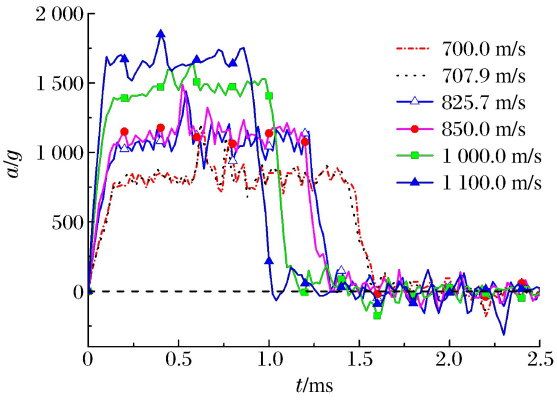

图 5 不同着速下的过载曲线

Fig. 5 Deceleration history curves at different impact velocities

基于上述实验和数值模拟现象，参考 M. J. Forrestal 等[8]对混凝土类目标侵彻力学的处理方法，本文中将铺层方向确定的层合木靶简化为均质材料处理，按 Poncelet 形式的阻力规律，假设弹体侵彻木靶的阻力分为与木靶材料性质相关的静态阻力项和与侵彻速度平方相关的惯性项，具有以下形式：

$$F = \pi a^2 (R + N\rho v^2) \tag{4}$$

式中：a 为弹体半径，R 为与靶板材料相关的阻力参数，N 为弹头形状系数，ρ 为靶板固定密度，v 为弹体侵彻瞬时速度。

参考 S. R. Reid 等[4]的研究结论，认为木靶材料在不同冲击速度下的强化规律为 $\sigma = s_r \sigma_c$，式中 σ_c 为木靶静态抗压强度。

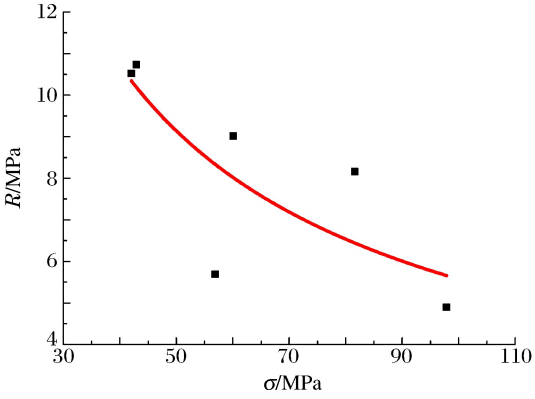

图 6 R 取值与靶板强度的关系

Fig. 6 Relationship between coefficient R and target strength

采用上述侵彻阻力模型，结合在 6 种侵彻工况下的数值模拟结果，反求 R 的取值，并进行曲线拟合，如图 6 所示，R 的表达式为 $R = 149.58\sigma^{-0.7145}$。

在上述侵彻阻力模型的基础上，可根据实验条件合理设计层合木靶厚度、发射初速等参数。

3 高速侵彻弹体层合木靶脱壳实验研究

为验证机械式脱壳方案的工程实践性，获取必要的高速侵彻层合松木靶实验数据校验数值模拟所用的参数，开展了基于 230 平衡炮的高速弹体贯穿层合松木靶机械式脱壳装置特性实验研究。

图 7 给出了高速侵彻弹体贯穿靶板前后的高速摄影结果。其中第 1 发实验弹体初速 825.7 m/s，垂直入射，第 2 发实验弹体初速度 591.9 m/s，以 2.8°的攻角向下入射。正侵彻条件下，弹体以 825.7 m/s的着靶速度贯穿层合松木靶的动能损失误差为 14.3%，这是由于验模后并未人为调整木靶参数，木材材料性能参数值与含水量、使用环境温度等相关，且实验数据也存在一定离散性，从而导致模拟结果与实验结果存在一定误差。

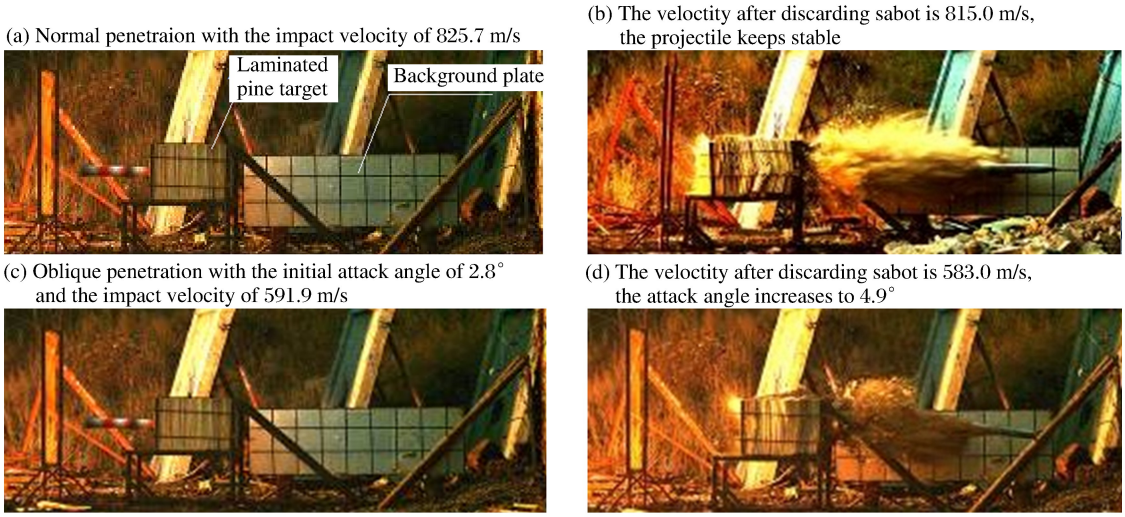

图 7　高速侵彻弹体贯穿层合松木靶实验照片

Fig. 7　Photos for high-velocity projectiles penetrating into laminated pine targets

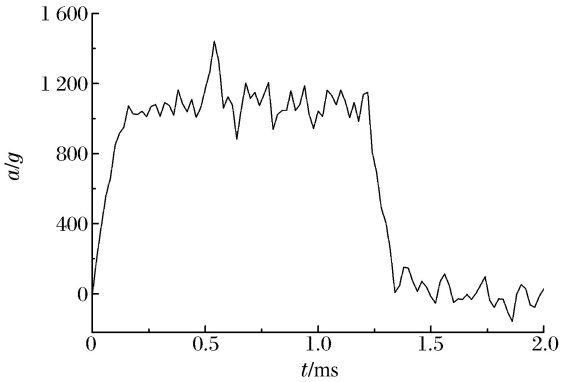

图 8　过载变化

Fig. 8　Deceleration varied with time

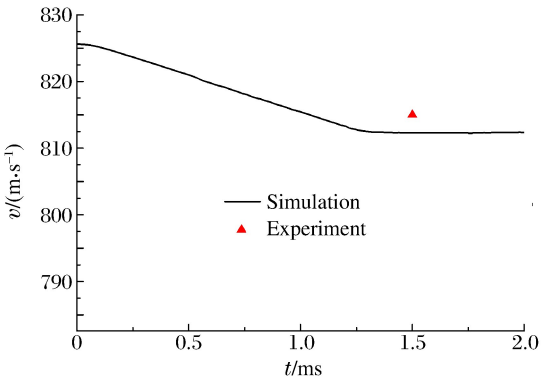

图 9　速度变化

Fig. 9　Velocity varied with time

过载和速度变化曲线如图 8、9 所示。在攻角侵彻条件下，弹体以初速度 591.9 m/s、攻角 2.8°向下侵彻。弹体脱壳后速度为 583.0 m/s，攻角放大为 4.9°。弹轴与靶板法线的夹角 β 变化如图 10 所示。通过实验可看出随侵深增加，弹体攻角均有所增加，呈现放大趋势。对于攻角侵彻入射层合木靶的情况，弹体贯穿靶板后存在的攻角放大，是由于出靶时存在绕质心旋转的角速度，其自由飞行的时间越长，弹体转动所引起的攻角越大。为获取准确的实验数据，初始攻角入射条件下的高速侵彻实验中，应保证炮口、层合木靶及后续被测混凝土靶之间的距离足够小。

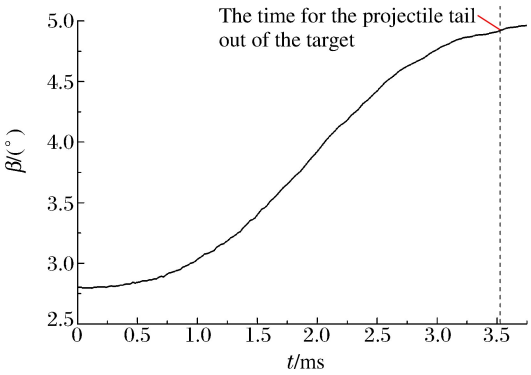

图 10　弹轴与靶板法线的夹角随时间的变化

Fig. 10　Variation of the angle between the axis of the projectile and the normal of the target with time

4　结　论

针对次口径发射高速侵彻实验有效脱壳的需求，研究了一种利用层合松木靶作为脱壳装置的机械式脱壳方法，结合高速侵彻实验数据对数值模拟方案进行验证与确认，讨论了一种正交各向异性材料模型用于高速侵彻木材的可行性及其参数化规律，以及不同弹靶作用条件下含弹托弹体对松木靶的侵彻/

贯穿规律。结果表明:(1)垂直入射条件下,通过合理的层合木靶设计可对次口径发射弹体有效脱壳,相比气动分离式、前后定心式弹托设计,高速侵彻弹体可垂直入射靶标,弹体无附加动能,速度衰减可基于数值模拟及简单工程模型预测;(2)初始攻角入射条件下,层合靶将使高速侵彻弹体攻角非线性放大,为获得准确的实验数据,高速侵彻实验中需保证弹体与弹托出炮口时姿态稳定,并尽量缩短炮口、脱壳装置及混凝土靶标间的距离;(3)随入射速度增加,弹体贯穿层合木靶消耗动能增加,体现了木材具有明显的应变率增强效应;(4)机械式脱壳方法用于高速侵彻实验的参数可设计、可控,可为同类型高速侵彻实验方案设计提供参考。

参考文献:

[1] Luther H W. Fin stabilized, subcaliber propelling cage sobot projectile: USA, US4920889 A[P]. 1990-05-01.

[2] Eches N, Bachelier J, Leblond J, et al. Sabot for fin-stabilized ammunition: USA, US6805058 B2[P]. 2004-10-19.

[3] Doolittle C, Malechuk D. Mid-scale testing and simulation of fuze terminal ballistic environments[C]//51st Annual Fuze Conference. Nashville, 2007.

[4] Reid S R, Peng C. Dynamic uniaxial crushing of wood[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997,19(5/6):531-570.

[5] Berberovic A, Milota M R. Impact of wood variability on the drying rate at different moisture content levels[J]. Forest Products Journal, 2011,61(6):3425585.

[6] Beltrame R, Mattos B D, Gatto D A, et al. Impact strength of nogueira-pecãwood on different moisture conditions [J]. Ciência Rural, 2012,42(9):1583-1587.

[7] Murray Y D. Manual for LS-DYNA wood material model 143[R]. FHWA-HRT-04-097, 2007.

[8] Forrestal M J, Altman B S, Cargile J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1994,15(4):395-405.

Discarding the sabot of a high-velocity projectile by a laminated wood target

Shen Chao, Pi Ai-guo, Liu Liu, Liu Jian-cheng, Huang Feng-lei

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: Experiments and numerical simulations were carried out to explore a mechanical method for discarding the sabot of a high-velocity projectile by a laminated wood target. First, the feasibility and parametric regular pattern of an orthotropic material model for wood in numerical simulation were discussed. And the numerical simulation program was verified and validated by combining with the hyper-speed penetration experimental data of U. S. Army. Then, the penetration/perforation phenomena were analyzed for a sabot-contained projectile impacting a laminated wood target under different conditions. The numerically simulated and experimental results show the followings. Under normal impact, the sabot of a sub-caliber projectile can be discarded effectively by a reasonably-designed laminated wood target, the projectile can penetrate vertically into the target and its velocity attenuation can be controllable. Under oblique impact, a laminated wood target can induce the attack angel of the projectile to increase. With the increasing of impact velocity, the consumption of a projectile's kinetic energy increases, which indicates that wood has an apparent strain-rate strengthening effect.

Key words: mechanics of explosion; discarding sabot; orthotropic material model; high-velocity penetration; projectile; laminated wood target

(责任编辑 张凌云)