

横向效应增强型弹垂直侵彻薄靶的轴向剩余速度理论分析*

丁亮亮¹, 汤文辉¹, 冉宪文¹, 樊自建^{1,2}, 肖凡³

(1. 国防科技大学文理学院, 湖南长沙 410073; 2. 国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073;

3. 中国人民解放军671267部队, 北京 101104)

摘要:为了得到横向效应增强型弹(Penetration with Enhanced Lateral Efficiency projectile, PELE)对金属薄靶垂直侵彻后的弹体轴向剩余速度,运用平面冲击波理论,对PELE的侵彻机理进行分析。参照平头弹体对靶板的侵彻模型,将PELE侵彻过程中的能量损失划分为以下几个部分:外壳体和内芯撞靶区域对应的环形塞块获得的能量、冲击波作用下弹体的内能增量以及剪切耗能等。然后根据能量守恒原理,得到PELE垂直侵彻金属薄靶后的PELE弹体轴向剩余速度的理论模型。为了验证该模型的合理性和准确性,设计相应的试验进行验证。结果表明,不同条件下得到的试验结果和理论模型得到的计算结果均吻合得较好。因此,得到的PELE垂直侵彻薄靶的轴向剩余速度理论模型可为工程应用提供指导和参考。

关键词:横向效应增强型弹;垂直侵彻;轴向剩余速度;平面冲击波理论

中图分类号:O383 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2019)02-057-06

Theoretical analysis of axial residual velocity of penetration with enhanced lateral efficiency pill vertical penetrating thin target

DING Liangliang¹, TANG Wenhui¹, RAN Xianwen¹, FAN Zijian^{1,2}, XIAO Fan³

(1. College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Aeronautics and Astronautics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. The PLA Unit 671267, Beijing 101104, China)

Abstract: In order to obtain the theoretical model of the axial residual velocity of PELE (penetration with enhanced lateral efficiency projectile) under the condition of vertical penetration, the plane shock wave theory was used to analyze the mechanism of PELE vertical penetrating metal thin target. According to the penetration model of the flat head projectile, the energy loss during the penetration of PELE was divided into the following parts: the energy obtained by the annular plug block corresponded to the outer shell and the inner core, the increased internal energy of the outer casing and inner core, the shear energy dissipated in the outer casing. Based on the principle of energy conservation, the theoretical model of axial residual velocity after PELE vertical penetrating thin metal targets was obtained. To verify the rationality and accuracy of the theoretical model, the corresponding experiments were designed to verify the results. The results show that the calculated results coincide well with the experimental results under different conditions. Therefore, the theoretical model of axial residual velocity of PELE vertical penetrating thin target can provide guidance and reference for engineering application.

Keywords: penetration with enhanced lateral efficiency projectile; vertical penetration; axial residual velocity; plane shock wave theory

随着战场目标多样性和防护机动性的增强,传统的穿甲侵彻战斗部已逐渐不能满足现代战场需求。2004年,一种新型侵彻体横向效应增强型弹(Penetration with Enhanced Lateral Efficiency projectile, PELE)应运而生,其结构主要由高密度的外壳和低密度的内芯构成,如图1所示。外壳体材料通常为钨或钢,内芯材料通常为铝或聚乙烯等。在PELE撞击靶板后,低密度内芯受到轴

向压缩而导致内部压力不断升高。此外,内芯和外壳体由于受到周围靶板的约束,轴向压力转化为径向压力。在弹体穿透靶板后,内芯材料周围的约束突然消失,外壳体在径向压力的作用下破裂成大量沿径向分布的破片。由此可见,PELE在具备一定穿甲能力的同时,还兼具一定的横向毁伤增强效应^[1-2]。

PELE对靶板的侵彻机理与传统平头穿甲弹

* 收稿日期:2018-01-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11072262,11002162)

作者简介:丁亮亮(1993—),男,河南南阳人,博士研究生,E-mail:dingliangliang14@nudt.edu.cn;

汤文辉(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:tangwenhui@nudt.edu.cn

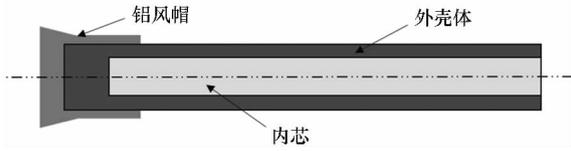


图 1 PELE 结构示意图

Fig. 1 Longitudinal section of the PELE

的侵彻机理有一定的相似之处。对于传统平头穿甲弹的侵彻机理研究已相对成熟^[3-5]，而关于 PELE 的侵彻机理研究则相对较少，大多通过数值仿真或试验对 PELE 穿靶过程及影响因素进行研究^[6-8]。Paulus 等^[9]基于一维线性波理论，根据动量守恒定律建立了 PELE 穿靶后弹体轴向剩余速度的理论计算模型。但由于一维线性波理论只适用于小变形问题，而 PELE 穿靶过程属于大变形问题，因此 Paulus 的研究方法存在一定缺陷。Ji 等^[10]结合能量守恒以及 de Marre 经验公式得到 PELE 穿靶后轴向剩余速度计算方法。马立等^[11]则基于 Recht-Ipson 理论以及能量守恒方程，建立了一种可用于分析 PELE 穿靶后轴向剩余速度的方法。然而，这两种方法都是把弹体视为刚性体，没考虑其在侵彻过程中的变形。Verreault^[12]从冲击波理论的角度出发，分析了 PELE 外壳与内芯间的相互作用，以此获得 PELE 穿靶后的破片沿径向飞散的速度模型。Fan 等^[13]根据冲击波理论，假定 PELE 的初始动能完全转化为侵彻阶段的压缩势能和穿透阶段的破片动能，也获得了 PELE 穿靶后的破片沿径向飞散的速度模型。

通过分析大量文献可以看出，PELE 穿靶后弹体轴向剩余速度直接决定了弹体的后续毁伤能力，而现有理论模型的研究方法均存在一定的局限性。为此，本文以平面冲击波理论为基础，对 PELE 穿靶过程的能量转化进行分析，并建立穿靶后 PELE 的轴向剩余速度理论模型，并对理论模型进行验证。

1 PELE 侵彻靶板的物理过程分析及假设

PELE 撞击靶板的瞬间会在接触面分别产生向弹体和靶板传播的两道冲击波。但是，由于 PELE 弹体长度远大于靶板厚度，这就意味着在靶板中传播的冲击波会先到达自由面并发生反射形成稀疏波。为此，将自弹靶接触至靶板中稀疏波回传到接触面的时间段，定义为弹靶撞击阶段；将靶板稀疏波回传到接触面至 PELE 弹贯穿靶板的时间段，定义为冲塞剪切阶段。于是，将 PELE

侵彻靶板的整个过程划分为：弹靶撞击阶段和冲塞剪切阶段。

对于 PELE 弹靶系统，其穿靶过程中的能量划分可以参照平头穿甲弹穿靶过程的能量划分。此外，为了能够得到穿靶后的 PELE 轴向剩余速度，还需要做如下假设：

- 1) 忽略撞靶瞬间弹体沿径向的膨胀；
- 2) 忽略穿靶过程中剪切力对冲击波强度的影响；
- 3) 将由弹靶碰撞引起的应变视为一维平面应变。

2 PELE 穿靶后剩余速度理论模型建立

2.1 冲击波后塞块内能及动能增量

在靶板反射回稀疏波之前，弹靶碰撞问题可近似为共轴碰撞问题，如图 2 所示。弹体包括高密度外壳和低密度内芯两部分，这必然导致撞击产生的冲击波强度不同，进而使得对应靶板撞击区域中的冲击波强度也不同。

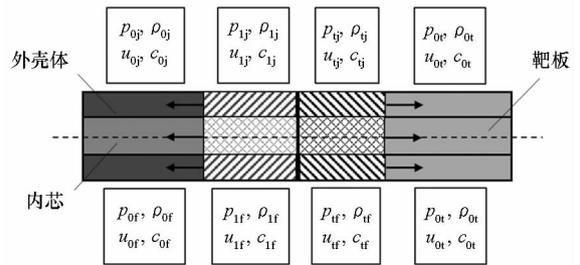


图 2 PELE 与靶板相互作用简化示意图

Fig. 2 Simplified schematic diagram of the interaction between projectile and target plate

对于 PELE 弹靶系统，假定质量为 m 的 PELE 弹体以 u_0 的速度撞击靶板，靶板的初始速度和压力以及弹体的初始压力均为 0。此外，对理论推导过程中用到的物理量做如下定义：单位面积压力为 P ；冲击波速度为 D ；密度为 ρ ；能量为 E ；质点速度为 u ；Hugoniot 常数为 c, λ ； t 代表靶板， j 代表壳体， f 代表内芯， t_j, t_f 分别外壳体和内芯与靶板碰撞；0 代表波前状态，1 代表波后状态。则根据冲击波相互作用可得到如下关系：

- 1) 以 PELE 外壳体为研究对象。PELE 外壳体初始状态为 $p_{0j}, \rho_{0j}, u_{0j}, c_{0j}$ ，弹靶撞击后在外壳体中产生左行冲击波，波后状态为 $p_{1j}, \rho_{1j}, u_{1j}, c_{1j}$ ，冲击波间断关系式和凝聚介质冲击绝热关系式为：

$$\begin{cases} P_{1j} = \rho_{0j} (D_j - u_0) (u_{1j} - u_0) \\ D_j - u_0 = -c_{0j} + \lambda_j (u_{1j} - u_0) \end{cases} \quad (1)$$

2)以PELE内芯为研究对象。PELE内芯的初始状态为 ρ_{0f} 、 ρ_{0r} 、 u_{0f} 、 c_{0f} ,弹靶撞击后在内芯中产生左行冲击波,波后状态为 p_{1f} 、 ρ_{1f} 、 u_{1f} 、 c_{1f} ,冲击波间断关系式和凝聚介质冲击绝热关系式为:

$$\begin{cases} P_{1f} = \rho_{0f}(D_f - u_0)(u_{1f} - u_0) \\ D_f - u_0 = -c_{0f} + \lambda_{1f}(u_{1f} - u_0) \end{cases} \quad (2)$$

3)以靶板为研究对象。靶板的初始状态为 ρ_{0t} 、 ρ_{0i} 、 u_{0t} 、 c_{0t} ,弹靶撞击后在靶板中产生右行冲击波,波后状态分为两个区域:

①外壳体和靶板作用区域。此时对应的波后状态为 p_{ij} 、 ρ_{ij} 、 u_{ij} 、 c_{ij} 。同样地,冲击波间断关系式和凝聚介质冲击绝热关系式为:

$$\begin{cases} P_{ij} = \rho_{0t} D_{ij} u_{ij} \\ D_{ij} = c_{0t} + \lambda_{1t} u_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

②内芯和靶板作用区域。此时对应的波后状态为 p_{if} 、 ρ_{if} 、 u_{if} 、 c_{if} 。同样地,冲击波间断关系式和凝聚介质冲击绝热关系式为:

$$\begin{cases} P_{if} = \rho_{0t} D_{if} u_{if} \\ D_{if} = c_{0t} + \lambda_{1t} u_{if} \end{cases} \quad (4)$$

根据相互作用区的力学平衡条件可知,间断面两侧的速度和压力是相等的,于是有:

①外壳体和靶板作用区的平衡条件: $P_{ij} = P_{1j}$, $u_{ij} = u_{1j}$ 。联立式(1)、式(3)可得PELE外壳体与靶板撞击后的质点速度表达式为:

$$(\rho_{0j}\lambda_j - \rho_{0t}\lambda_t)u_{ij}^2 - (2\rho_{0j}\lambda_j v_0 + \rho_{0j}c_{0j} + \rho_{0t}c_{0t})u_{ij} + \rho_{0j}\lambda_j v_0^2 + \rho_{0j}c_{0j}v_0 = 0 \quad (5)$$

求解方程(5),可得到外壳体与靶板碰撞后的质点速度为:

$$u_{ij} = \frac{2\rho_{0j}\lambda_j v_0 + \rho_{0j}c_{0j} + \rho_{0t}c_{0t}}{2(\rho_{0j}\lambda_j - \rho_{0t}\lambda_t)} - \sqrt{\frac{(2\rho_{0j}\lambda_j v_0 + \rho_{0j}c_{0j} + \rho_{0t}c_{0t})^2}{4(\rho_{0j}\lambda_j - \rho_{0t}\lambda_t)^2} - \frac{\rho_{0j}\lambda_j v_0^2 + \rho_{0j}c_{0j}v_0}{\rho_{0j}\lambda_j - \rho_{0t}\lambda_t}}$$

②内芯和靶板作用区的平衡条件: $P_{if} = P_{1f}$, $u_{if} = u_{1f}$ 。同理,联立式(2)、式(4)可得到内芯与靶板碰撞后的质点速度为:

$$u_{if} = \frac{2\rho_{0f}\lambda_f v_0 + \rho_{0f}c_{0f} + \rho_{0t}c_{0t}}{2(\rho_{0f}\lambda_f - \rho_{0t}\lambda_t)} - \sqrt{\frac{(2\rho_{0f}\lambda_f v_0 + \rho_{0f}c_{0f} + \rho_{0t}c_{0t})^2}{4(\rho_{0f}\lambda_f - \rho_{0t}\lambda_t)^2} - \frac{\rho_{0f}\lambda_f v_0^2 + \rho_{0f}c_{0f}v_0}{\rho_{0f}\lambda_f - \rho_{0t}\lambda_t}}$$

于是,可以得出弹靶撞击作用下部分靶板材料在冲击波过后增加的动能。

$$E_{ij} = \frac{1}{2}\pi(R^2 - r^2)h\rho_{0t}u_{ij}^2 \quad (6)$$

$$E_{if} = \frac{1}{2}\pi r^2 h\rho_{0t}u_{if}^2 \quad (7)$$

其中, R 为外壳体半径, r 为弹体内芯半径, h 为

靶厚。

在弹靶撞击过程中形成的冲击波通常压力较高,远大于初始压力 P_0 ,即 $P \gg P_0$,因此可以忽略 P_0 。由冲击绝热条件下的 $P - \tau$ 关系可知,因冲击压缩产生的总功可近似认为被平均分配给了波后塞块的内能和动能。因此,塞块的总能量可由两倍动能表示,即:

$$e_{ij} = 2E_{ij} = \pi(R^2 - r^2)h\rho_{0t}u_{ij}^2 \quad (8)$$

$$e_{if} = 2E_{if} = \pi r^2 h\rho_{0t}u_{if}^2 \quad (9)$$

2.2 冲击波后弹体内能增量

根据以上冲击波关系式,可以分别得到撞靶后的外壳中冲击波速度 D_{ij} 、内芯中冲击波速度 D_f ,以及靶板中的冲击波速度 D_{ij} 和 D_{if} 。假设冲击波经历一次卸载完成,那么经过分析可以得到外壳体和内芯中压力传播时长。

$$t_j = \frac{h}{D_{ij}} + \frac{h - u_{ij}t_j}{c_{0t} - u_{ij}} \quad (10)$$

$$t_f = \frac{h}{D_{if}} + \frac{h - u_{if}t_f}{c_{0t} - u_{if}} \quad (11)$$

根据冲击绝热关系以及波后靶板中的质点速度,因冲击波压缩带来的外壳体和内芯在 t_j 和 t_f 内的内能改变量可分别由其动能增量表示。

$$E_{1j} = \frac{1}{2}u_{1j}^2 \pi(R^2 - r^2)D_{ij}t_j\rho_{0j} \quad (12)$$

$$E_{1f} = \frac{1}{2}u_{1f}^2 \pi r^2 D_{if}t_f\rho_{0f} \quad (13)$$

2.3 塞块的剪切耗能

由于PELE弹的外壳体和内芯材料的可压缩性存在较大差异,弹体在穿靶过程中外壳体的外沿和内沿都会对靶板产生剪切作用。剪切力的作用距离可以由外壳体前端和靶板接触面以及内芯前端和靶板接触面之间的速度差及相对运动时间确定。假设在稀疏波回传至弹靶接触面之前,两个接触面上的速度是相同的,则在该段时间内两个接触面的位移差为:

$$\Delta h = (u_{ij} - u_{if})t_f \quad (14)$$

根据平头弹侵穿靶板的计算理论^[14],PELE壳体外沿对靶板冲塞剪切耗能 $E_{\tau j}$ 和PELE壳体内沿对靶板冲塞剪切耗能 $E_{\tau f}$ 可以分别表示为:

$$E_{\tau j} = \frac{1}{\sqrt{3}}\pi R\sigma_Y^D h^2 \quad (15)$$

$$E_{\tau f} = \frac{1}{\sqrt{3}}\pi r\sigma_Y^D \Delta h^2 \quad (16)$$

其中, σ_Y^D 表示动态屈服应力。

2.4 穿靶后弹体轴向剩余速度

PELE在撞靶过程中会受到冲击波影响而内

能增加,但在碰撞过程中内芯会发生变形、外壳体会发生径向膨胀和破碎。假定弹体增加的内能因为以上因素而全部损耗掉,那么弹体在撞靶过程中的动能损失主要转化为塞块增加的能量以及因剪切作用而损耗的能量。于是,穿靶后 PELE 的轴向剩余速度可以根据能量守恒定律确定为:

$$u_{res} = \sqrt{u_0^2 - \frac{2}{m}(e_{ij} + e_{if} + E_{1j} + E_{1t} + E_{rj} + E_{rt})} \tag{17}$$

3 理论模型验证及结果分析

3.1 试验布置

为了验证所建立的 PELE 穿靶后轴向剩余速度理论模型,有针对性地进行了试验设计,并测量了 PELE 穿靶后的轴向剩余速度。试验中 PELE 外壳为钨合金,外壳壁厚为 2.0 mm,外径为 5.0 mm,内径为 3.0 mm,总长度为 40.0 mm,内孔深为 37.0 mm;内芯采用聚四氟乙烯和铝,高度为 37.0 mm,半径为 3.0 mm。

为了保证发射时发射管内的气密性良好,在外壳上包覆了一层厚度为 1.5 mm 的紫铜。弹体

直径为 13.0 mm,发射试验枪口径为 12.7 mm,测速靶板为 3.0 mm 厚的铝板,测速靶采用光幕靶,同时在靶后放置铜箔靶用于测试穿靶后弹体的剩余轴向速度,试验整体布置如图 3 所示。为了保证试验的一致性和准确性,每组工况做两组对照试验。

3.2 试验结果及分析

假定两铝靶靶距为 L_0 ,测得的弹体穿过两靶板时间为 t ,那么弹体穿靶后的轴向剩余速度可表示为:

$$u_{res} = \frac{L_0}{t} \tag{18}$$

为了能够根据前文所建立的理论模型快速计算出穿靶后弹体的轴向剩余速度,所需材料参数如表 1 所示。于是,可以得到穿靶后 PELE 轴向剩余速度的试验结果和计算结果以及弹体穿靶后产生破片的径向飞散速度,如表 2 所示。

由表 2 可知,PELE 弹体穿靶后产生的破片在径向具有一定的飞散速度,这是传统的穿甲弹所不具备的。因此,该现象也进一步验证了 PELE 在侵彻靶板过程中具备横向效应。

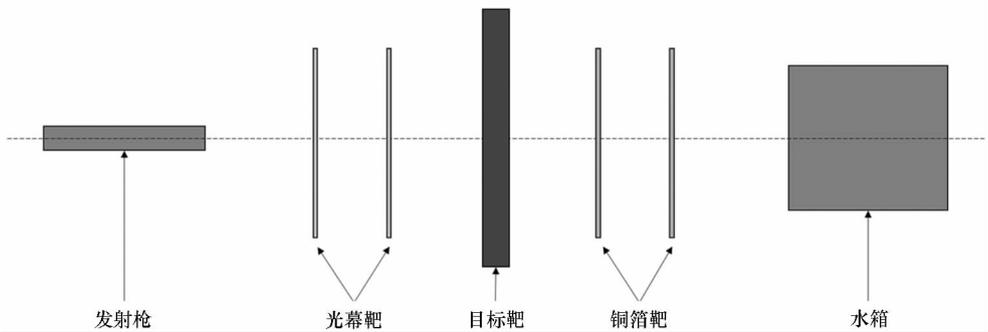


图 3 试验整体布置示意图

Fig. 3 Experimental equipment layout diagram

表 1 试验弹靶材料参数

Tab. 1 Material properties of PELE project and target

材料属性	壳体材料	内芯材料		靶板材料
	钨	聚四氟乙烯	铝	铝
密度 $\rho_0 / (\text{g}/\text{cm}^3)$	18.0	2.15	2.7	2.8
声速 $c_0 / (\text{m}/\text{s})$	4029	1682	5350	5370
Hugoniot 常数 λ	1.237	1.82	1.34	1.3
动态屈服应力 σ_Y^D				1.2

表 2 穿靶后 PELE 弹轴向剩余速度试验结果与计算结果对比

Tab. 2 Residual velocity of experiment and calculation for PELE

内芯材质	实测弹体初始速度	试验轴向剩余速度	计算轴向剩余速度	破片径向飞散速度
	m/s			
铝	806	788	779	105
	798	780	772	102
聚四氟乙烯	809	790	784	77
乙烯	802	787	776	73

为了更加直观地分析基于理论模型得到的轴向剩余速度与试验获得的剩余速度之间的接近程度,定义相对误差为:

$$\alpha = \frac{u_{cal} - u_{exp}}{u_{exp}} \times 100\% \quad (19)$$

根据试验结果,得到弹体撞击速度与穿靶后轴向剩余速度之间的关系,如图4所示。另外,还得到轴向剩余速度试验结果和计算结果的相对误差,如图5所示。

分析计算与试验结果可知,对于两种不同内芯的 PELE 弹体,试验结果和计算结果较为一致,相对误差在 2% 以内。另外,两种不同内芯的 PELE 弹体在穿靶后,靶后剩余速度基本相同。对于两种不同内芯的 PELE,由于聚四氟乙烯和铝内芯材料的密度相差不大,二者对应的弹体质量相差 4.5% 左右。因此在相同速度下,这两种弹芯材料对应的 PELE 动能相差较小。

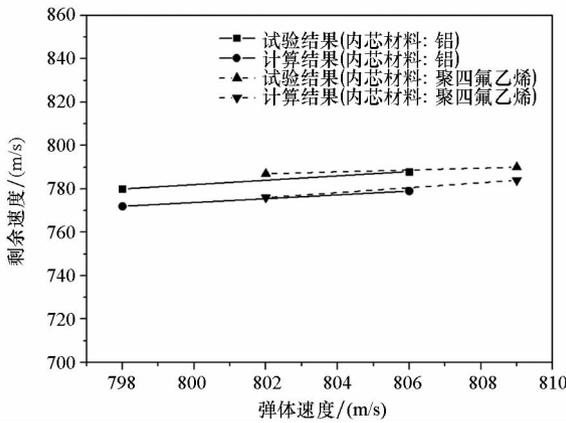


图4 不同 PELE 内芯对应的试验结果和计算结果
Fig.4 Experiment and calculation results for different PELE inner core materials

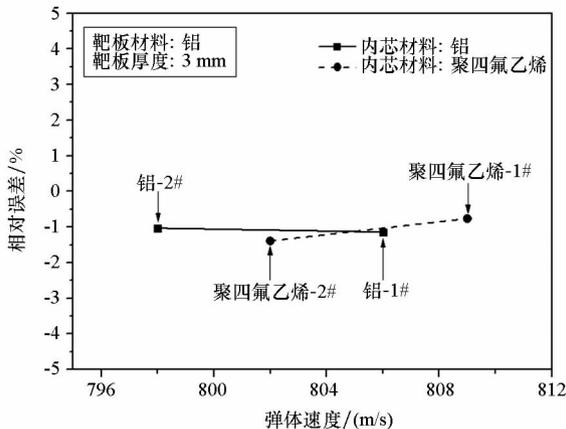


图5 试验结果和计算结果的相对误差
Fig.5 Relative error between experiment results and calculation results

为了进一步说明所建立的轴向剩余速度理论模型的合理性,选取文献[9]中的若干组试验数据进行对比分析。选取的试验工况及相应的弹体轴向剩余速度如表3所示。根据表3中的数据,可以分别得到基于本文建立的模型和文献[9]中建立的模型求得的弹体轴向剩余速度与试验中实测的弹体轴向剩余速度之间的相对误差 α ,如图6所示。

表3 试验工况及相应的弹体轴向剩余速度
Tab.3 Test conditions and the axial residual velocity of the PELE

内芯 材质	靶板 材质	初始 速度/ (m/s)	弹体轴向剩余速度/(m/s)		
			实测	本文	文献[9]
聚乙烯	铝 (8 mm)	939	887	890	898
		1258	1203	1207	1207
		2445	2393	2403	2353
		2997	2952	2890	

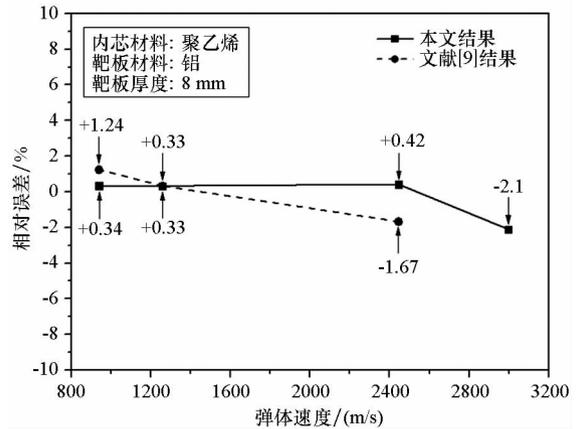


图6 本文计算结果与文献[9]中的试验及计算结果对比

Fig.6 Calculation results in this paper compared with the experimental and calculated results in reference[9]

从表3和图6可以很直观地看出,基于本文所建立的模型计算得到的弹体轴向剩余速度结果要优于文献[9]中建立的模型得到的剩余速度结果,尤其是对于较高速度的撞击,文献[9]中建立的模型已不适用。因此,通过对比分析可以进一步证实本文建立的模型理论的合理性。

4 结论

本文基于平面冲击波理论以及平头穿甲弹的侵彻耗能分析理论,并运用冲击波相互作用原理

的冲击波间断关系和凝聚介质冲击绝热关系,建立了 PELE 正侵彻靶板后的轴向剩余速度理论分析模型。为了验证该理论分析模型的合理性,通过以下两种方式进行对比验证:

1) 设计了四组试验进行验证,结果表明,在试验弹体速度为 800 m/s 的条件下,试验结果和计算结果之间的误差在 2% 以内。

2) 以文献[9]中的试验结果为依据,将本文建立的理论模型和文献[9]中建立的理论模型所得到的计算结果进行对比,结果表明,本文所建立的模型更优,尤其是对于较高速度的撞击。

以上两种验证方式都说明了本文建立的理论分析模型是合理的。此外,在试验过程中还发现:对于两种不同内芯的 PELE,由于内芯的密度差异不大,弹体质量仅相差 4.5% 左右。因此,在速度相同条件下,二者动能相差不大,且二者的轴向剩余速度也比较接近,这说明当内芯材料的密度和力学性能差异不大时,对 PELE 的侵彻能力不会产生较大影响。

参考文献 (References)

- [1] Kesberg G, Schirm V, Kerk S. PELE: the future ammunition concept [C] // Proceedings of 21st International Symposium on Ballistics, 2004: 1134 - 1144.
- [2] Paulus G, Chanteret P Y, Wollmann E. PELE: a new penetrator concept for generating lateral effects [C] // Proceedings of 21st International Symposium on Ballistics, 2004: 104 - 110.
- [3] 潘建华, 文鹤鸣. 平头弹丸正撞下延性金属靶板的破坏模式[J]. 高压物理学报, 2007, 21(2): 157 - 164.
PAN Jianhua, WEN Heming. Failure modes of ductile metal plates under normal impact by flat-ended projectiles [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2007, 21 (2): 157 - 164. (in Chinese)
- [4] 陈小伟, 梁冠军, 姚勇, 等. 平头弹穿透金属靶板的模式分析[J]. 力学学报, 2009, 41(1): 84 - 90.
CHEN Xiaowei, LIANG Guanjun, YAO Yong, et al. Perforation modes of metal plates struck by a blunt rigid projectile [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2009, 41(1): 84 - 90. (in Chinese)
- [5] Chen X W, Li Q M. Shear plugging and perforation of ductile circular plates struck by a blunt projectile [J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(5): 513 - 536.
- [6] 蒋建伟, 张谋, 门建兵, 等. 不同内核材料 PELE 弹丸对多层靶板穿甲实验研究 [J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(9): 1009 - 1012.
JIANG Jianwei, ZHANG Mou, MEN Jianbing, et al. Experimental study on multi-layered target penetration of PELE with different cores [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30 (9): 1009 - 1012. (in Chinese)
- [7] 朱建生, 赵国志, 杜忠华, 等. 靶板厚度对横向效应增强型侵彻体作用效果的影响[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2009, 33(4): 474 - 479.
ZHU Jiansheng, ZHAO Guozhi, DU Zhonghua, et al. Influence of target thickness on lateral effect of PELE [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2009, 33(4): 474 - 479. (in Chinese)
- [8] Tu S Y, Wang J B, An Z T, et al. Influence of thickness of armor on the burst-effect of steel shell PELE [C] // Proceedings of 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2009: 4926 - 4929.
- [9] Paulus G, Schirm V. Impact behavior of PELE projectiles perforating thin target plates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 33(1): 566 - 579.
- [10] Ji P Y, Wang H F. Ballistic limit and residual velocity of PELE penetrating against metal target [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2011, 20(2): 183 - 186.
- [11] 马立, 吴玉斌. 横向增强效应型弹药侵彻剩余速度分析[J]. 科学技术与工程, 2011(22): 5375 - 5377.
MA Li, WU Yubin. Penetration residual velocity analysis of penetrator with enhanced lateral efficiency [J]. Science Technology and Engineering, 2011(22): 5375 - 5377. (in Chinese)
- [12] Verreault J. Analytical and numerical description of the PELE fragmentation upon impact with thin target plates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 76: 196 - 206.
- [13] Fan Z J, Ran X W, Tang W H, et al. The model to calculate the radial velocities of fragments after PELE penetrator perforating a thin plate [J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 77: 12 - 16.
- [14] 张国伟. 终点效应及靶场试验 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
ZHANG Guowei. Terminal effect and experiment of shooting range [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. (in Chinese)