

PELE 正侵穿金属薄靶轴向剩余速度近似计算与分析*

樊自建^{1,2}, 冉宪文², 汤文辉², 于国栋³, 李泽斌², 陈为科³

(1. 国防科技大学 指挥军官基础教育学院, 湖南 长沙 410072;

2. 国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073; 3. 国营 806 厂, 广东 佛山 528231)

摘要:运用冲击波理论,对横向效应增强型弹丸(Penetration with Enhanced Lateral Efficiency, PELE)侵穿金属靶板的机理进行了分析,将 PELE 侵彻过程中能量损失分为外壳和内芯撞击靶板区域环形塞块获得的能量,冲击波影响范围内外壳和内芯增加的内能,外壳前端外沿和内沿对靶板冲塞剪切耗能等,给出了确定这些能量的计算方法;并依据能量守恒原理,给出了 PELE 正撞金属薄靶板靶后剩余速度的近似计算公式。公式计算结果与多种条件下实验结果均吻合较好。分析计算所得各能量损失结果表明,弹体内芯材料的变化对弹体侵彻能力的影响较小;侵彻中靶板塞块获得的能量在弹体侵彻动能损失中比重最大;外壳前端内沿对靶板的剪切能耗对弹体动能损失的影响可以忽略。

关键词:横向效应增强;穿甲;冲击波理论;金属薄板

中图分类号: O383 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2015)05-084-07

Approximate calculation on the axial residual velocity of the PELE penetrate thin metal target plate

FAN Zijian^{1,2}, RAN Xianwen², TANG Wenhui², YU Guodong³, LI Zebin², CHEN Weike³

(1. College of Basic Education, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China;

2. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. State-operated 806 Company of Guangdong, Foshan 528231, China)

Abstract: By using the shock wave theory, the process that PELE (Penetrator with Enhanced Lateral Efficiency) penetrated a thin metal target was analyzed. The energy loss of the PELE in the process of penetrating the target plate could be divided into the energy obtained by plug when jacket and filling impacted the target, the increased internal energy of jacket and filling, and the shear energy dissipated in the outer and inner edge on the front end of jacket in the process of penetrating the target, etc. Based on the principle of conservation of energy and the method to determine these energies, the approximate formula of the axial residual velocity of PELE was presented. Results show that the axial residual velocity and the calculated results are in good agreement with the experimental data. Compared with the energy loss in different conditions, the filling material has little effect on projectile penetrating ability, and the energy that the plug obtained is the largest while the shear dissipated energy can be neglected.

Key words: enhanced lateral effect; penetration; shock wave theory; thin metal plate

横向效应增强型弹丸(Penetration with Enhanced Lateral Efficiency, PELE),是近几年提出的一种新概念弹药^[1-2],其主要由高密度外壳和低密度内芯材料两部分组成。PELE 弹侵穿靶板的能力和靶后弹体破片数量及径向飞散速度是衡量其破坏效能的重要指标。PELE 对靶板的侵穿过程中受到的碰撞挤压是穿靶后弹体破碎的能量源,因此对 PELE 侵穿靶板机理的研究可为靶后弹体破碎及径向飞散研究奠定基础。从现有文献看,有关 PELE 侵穿金属薄靶板机理研究的文

献较少,大多数相关文献都是通过数值模拟或实验对 PELE 的侵穿能力及影响因素进行研究^[3-7];PELE 对金属薄靶板的侵穿机理与普通平头弹侵彻机理有一定的相似性,而有关普通弹丸穿甲机理研究的文献较多^[8-11],理论也较为成熟;文献[12]利用能量守恒理论和 De Marre 经验公式给出了 PELE 穿靶后轴向剩余速度的计算方法;文献[13]利用 Recht-Ipson 理论和能量守恒关系给出了 PELE 弹体轴向剩余速度的分析方法。但以上两种方法都是基于平头刚性弹体侵彻理

* 收稿日期:2014-10-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11002162)

作者简介:樊自建(1978—),男,山东郓城人,博士研究生,E-mail:zjfan97@sina.com;

汤文辉(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:tangwenhui@163.com

论,不能分析侵彻过程中的弹体变形。文献[14]依据 Recht-Ipson 理论计算给出了 PELE 穿靶后的轴向剩余速度计算结果。文献[15]基于变形弹体挤凿机理,应用动量守恒理论建立了 PELE 弹侵穿金属薄靶板后弹体轴向剩余速度的计算模型。文献[14]、文献[15]给出的 PELE 侵穿靶板的分析方法是基于弹体变形理论给出的,可以用于对弹体靶后破碎及径向飞散速度的分析,但以上两侵穿模型均是基于一维线性波理论,该理论只有在小应变的条件下才成立;PELE 侵穿靶板的过程中弹靶间的压力较高,弹体内芯和靶板均发生了较大的变形。因此运用一维线性波理论分析 PELE 侵穿靶板存在一定局限性。平面冲击波理论可用于分析固体材料在高压下材料的大变形情况,但是平面冲击波关系只在一维应变条件下才成立,对于大长径比弹体穿靶过程的分析一般并不适用;但是 PELE 弹体结构与普通弹体结构不同,且侵穿过程中薄靶剪切力对弹靶撞击的影响有限,因此在一定的假设下应用平面冲击波理论对 PELE 穿靶过程进行分析,也是一种近似计算方法。

本文以平面冲击波理论为基础,结合靶板侵穿中塞块剪切力对弹体动能的影响,分析了 PELE 侵彻过程中各类能量损耗及其确定方法,并在此基础上对 PELE 穿靶后的轴向剩余速度进行了计算。

1 PELE 侵穿金属薄靶板机理分析

1.1 PELE 侵彻靶板物理过程分析及一维平面冲击波假设

PELE 弹靶撞击瞬间在靶板中产生一传向靶板背面的冲击波,同时在弹体中产生一个与弹体飞行方向相反的冲击波(如图 1 所示);对于靶板由于撞击面与四周靶板材料存在剪切力,因此会在靶板中产生一向靶板四周传播的剪切波;弹体由于内芯与外壳材料不同,弹体内芯与外壳冲击波的强度和速度不同,冲击波平面过后的弹体表面向弹体内传播轴向稀疏波,使得弹体发生径向膨胀。平面冲击波关系是在一维平面应变条件下得出的,为了应用平面冲击波理论对 PELE 侵穿靶板的过程进行分析需做以下假设:

①略去弹靶接触面四周靶板剪切力对撞击冲击波强度的影响。弹靶撞击区与周边靶板间质点运动速度差产生的剪切力,使得弹靶撞击界面运动速度降低,撞击压力增加,对于薄靶板此剪切力相对于弹靶撞击的压力较小,因此可将其忽略。

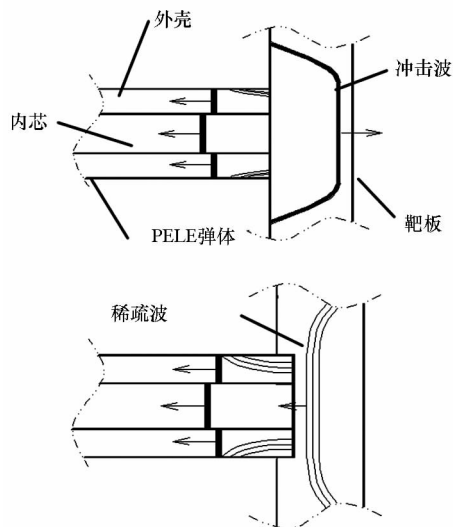


图 1 PELE 弹靶撞击时冲击波与稀疏波传播示意图
Fig. 1 Schematic of the shock and expansion waves in impacting process of PELE projectile and target plate

②在弹靶撞击至靶板背面稀疏波传递到弹靶接触面的时长内,略去弹体径向膨胀的影响。弹芯材料由于受到弹体外壳的约束,可以将弹靶撞击引起的变形看作一维平面应变。冲击波过后的弹体外壳在周向表面稀疏波的作用下,将发生径向膨胀,但是在考察时间范围内,其表径向膨胀值有限,再考虑到随着弹体侵入靶板,弹体外壳的径向变形会受到四周靶板材料的限制,因此在弹靶撞击过程中,可将弹体前端的径向膨胀忽略。

由以上两个条件,PELE 与靶板的撞击可以近似看作一维平面碰撞。PELE 弹对薄靶板的侵彻与普通平头弹的侵彻过程相似,可参照平头弹的剪切阻力模型对其穿靶过程进行分析,剪切阻力模型将弹丸穿靶过程中的能量损耗分为弹靶自由碰撞耗能和塞块冲出靶板过程的剪切力耗能^[16]。对于 PELE 弹靶系统,自由碰撞耗能部分依据冲击波理论,可将其分为靶板塞块的冲击压缩势能及波后质点的动能,弹体外壳和内芯的冲击波压缩势能等;塞块剪切力消耗的能量,依据 PELE 弹体的特点,可将其分为弹体外沿与靶板剪切耗能和弹体外壳内沿与靶板剪切耗能两部分。

1.2 靶板塞块冲击波后内能及动能增量

若用 p 表示单位面积压力; ρ 表示密度; D 表示冲击波速度; u 表示质点速度; E 表示能量; c, s 表示材料的 Hugoniot 常数;用下标 j 表示 PELE 壳体材料的参数,下标 f 表示弹芯材料的参数,下标 t 表示靶板的参数,下标 jt 表示外壳与靶板撞击后靶板的波后状态,下标 ft 表示内芯与靶板撞击后靶板

材料的波后状态;下标 0 表示材料波前状态,下标 1 表示材料波后状态改变量。对于 PELE 弹靶系统,靶板的初始速度和压力以及弹体的初始压力均为 0,若质量为 m 的 PELE 弹体以 u_0 的速度撞击靶板,对于弹体外壳由冲击波关系式有^[17]:

$$p_{1j} = \rho_{0j} D_j u_{1j} \quad (1)$$

$$D_j = c_{0j} + s_j u_{1j} \quad (2)$$

对于靶板有

$$p_{j1} = \rho_{01} D_{j1} u_{j1} \quad (3)$$

$$D_{j1} = c_{01} + s_{1j} u_{j1} \quad (4)$$

弹体外壳与靶板的碰撞面为接触间断面,接触面两侧的速度和压力相等,即:

$$p_{1j} = p_{j1} \quad u_0 - u_{1j} = u_{j1} \quad (5)$$

由式(1)~(5)可得

$$\begin{aligned} & (\rho_{01} s_{1j} - \rho_{0j} s_j) u_{j1}^2 + (\rho_{01} s_{1j} + \rho_{0j} s_j + 2\rho_{0j} s_j u_0) u_{j1} - \\ & \rho_{0j} u_0 (c_{0j} + s_j u_0) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

解式(6)即可得 PELE 外壳与靶板撞击后,冲击波后靶板质点速度表达式如下:

$$u_{j1} = \frac{\sqrt{(\rho_{01} c_{01} + \rho_{0j} c_{0j} + 2\rho_{0j} s_j u_0)^2 + 4(\rho_{01} s_{1j} - \rho_{0j} s_j) \rho_{0j} u_0 (c_{0j} + s_j u_0)} - (\rho_{01} c_{01} + \rho_{0j} c_{0j} + 2\rho_{0j} s_j u_0)}{2(\rho_{01} s_{1j} - \rho_{0j} s_j)} \quad (7)$$

同理可得内芯与靶板撞击后,冲击波后靶板质点速度表达式如下:

$$u_{f1} = \frac{\sqrt{(\rho_{01} c_{01} + \rho_{0f} c_{0f} + 2\rho_{0f} s_f u_0)^2 + 4(\rho_{01} s_{1f} - \rho_{0f} s_f) \rho_{0f} u_0 (c_{0f} + s_f u_0)} - (\rho_{01} c_{01} + \rho_{0f} c_{0f} + 2\rho_{0f} s_f u_0)}{2(\rho_{01} s_{1f} - \rho_{0f} s_f)} \quad (8)$$

由式(7)、式(8)并结合冲击波关系式,可以得出弹靶撞击作用部分靶板材料在冲击波过后增加的动能。

$$E_{j1} = \frac{1}{2} u_{j1}^2 \pi (R^2 - r^2) h \rho_{01} \quad (9)$$

$$E_{f1} = \frac{1}{2} u_{f1}^2 \pi r^2 h \rho_{01} \quad (10)$$

式中, R 为 PELE 弹外壳半径, r 为内芯半径, h 为靶板厚度。实验条件下的弹靶系统,处于常压、常温状态下,且碰撞过程形成的冲击波压力相对较高,在此状态下,可以忽略初始压力的影响,依据冲击绝热条件下材料压力与比容的关系,可以认为冲击压缩做的总功平均分配给波后靶板材料增加的内能和动能^[18];因此,对于 PELE 外壳影响的靶板环形塞块和内芯影响的靶板内塞块所获得的总能量,可由其获得的动能的两倍表示为:

$$E_{j1} = u_{j1}^2 \pi (R^2 - r^2) h \rho_{01} \quad (11)$$

$$E_{f1} = u_{f1}^2 \pi r^2 h \rho_{01} \quad (12)$$

1.3 弹体冲击波后内能增量

由式(7)、式(8),结合冲击波关系式,可以分别得到外壳与靶板撞击时靶板冲击波速度 D_{j1} 、内芯与靶板撞击时靶板冲击波速度 D_{f1} 以及弹体外壳和内芯冲击波速度 D_j 和 D_f 。PELE 外壳与内芯撞击冲击波的持续时长由弹靶发生撞击时刻到靶后稀疏波到达弹靶撞击面的时长确定,假设弹靶接触面的冲击波强度卸载一次完成,则 PELE 外壳和内芯的冲击波压力持续时长 t_j 和 t_f 分别为:

$$t_j = \frac{(c_{01} + D_{j1})h}{(c_{01} + u_{j1})D_{j1}}, \quad t_f = \frac{(c_{01} + D_{f1})h}{(c_{01} + u_{f1})D_{f1}}$$

根据冲击波基本关系式,PELE 外壳和内芯在 t_j 和 t_f 时间内冲击波压缩过的材料增加的内能

可由其动能改变量表示为:

$$E_{1j} = \frac{1}{2} u_{1j}^2 \pi (R^2 - r^2) D_{j1} t_j \rho_{0j} \quad (13)$$

$$E_{1f} = \frac{1}{2} u_{1f}^2 \pi r^2 D_{f1} t_f \rho_{0f} \quad (14)$$

1.4 塞块冲塞剪切耗能

依据平头弹侵穿靶板的计算理论,靶板冲塞剪切耗能可以表示为^[19]:

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

由于 PELE 外壳冲击波阻抗高于内芯,侵彻过程中,外壳与靶板间的环形接触界面碰撞后运动速度比内芯与靶板间的接触界面运动速度快,因此在外壳内沿也形成对靶板的剪切;剪切力作用的距离由两接触面的速度差及两界面的运动时间确定,假设靶板外环塞块与内塞块弹靶撞击接触面的速度在内塞块稀疏波传至撞击接触面时相同,则两界面在此时间内运动的距离差 Δh 可表示为:

$$\Delta h = (u_{j1} - u_{f1}) t_{f0}$$

与式(15)同理,PELE 外壳内沿剪切靶板所消耗的能量可近似表示为:

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

1.5 弹体穿靶后轴向剩余速度

PELE 弹体受冲击波影响增加的内能受到材料塑性变形、破裂以及体破片径向动能转化的影响,假设已全部损耗掉,不能再次转换为弹体的动能;靶板塞块在弹靶撞击冲击波作用下增加的能量和弹体对靶板冲塞剪切损耗的能量均为弹丸损

失掉的动能。由能量守恒原理可以确定 PELE 穿靶后轴向剩余速度 u_{res} 为:

$$u_{res} = \sqrt{u_0^2 - \frac{2}{m}(E_{jt} + E_{ft} + E_{lj} + E_{lj} + E_{tj} + E_{tj})} \quad (17)$$

2 PELE 弹侵彻金属薄靶板理论计算结果的实验验证与分析

2.1 实验条件

文献[14]给出了不同内芯 PELE 侵彻金属薄靶板的实测靶后的剩余速度。其实验条件为: PELE 弹丸分为两种,侵彻速度小于 2500m/s 时,弹体总长度为 50mm,弹丸直径为 10mm,弹芯直径为 6mm;侵彻速度高于 2500m/s 时,弹体总长度为 40mm,弹丸直径为 8mm,弹芯直径为 4mm。两种情况下弹体外壳材料均为钨合金(D180K),弹芯材料分别采用了铝(A-G3)和聚乙烯(PE)材料,靶板分别采用了 3mm、8mm 厚的铝靶(A-U4G)以及 3mm 厚的钢靶(XC48);弹体与靶板材料的性能参数如表 1 所示。

表 1 中给出的靶板屈服应力为一维应力下材料屈服应力,PELE 侵彻靶板过程中,靶板塞块受到四周材料的约束,为一维应变状态。依据文献[20]对于低碳钢材料的屈服应力一维应变下可取为一维应力下的 3 倍,对于铝材可取为 2.7 倍,即理论计算时 A-U4G 靶板动态屈服应力 $\sigma_Y^D = 1.16\text{GPa}$,XC48 靶板动态屈服应力 $\sigma_Y^D = 2.16\text{GPa}$ 。

2.2 理论计算结果实验验证

依据 2.1 节所述的方法及上述弹靶材料参数,可计算 PELE 侵穿靶板过程中损失的各类能量,再依据式(17)可计算不同条件下 PELE 穿靶后弹体剩余的轴向速度,计算结果与实验结果的对比分别如表 2、表 3 所示。

表 1 弹、靶材料参数^[14]

Tab. 1 Projectile and target material properties

	弹体材料			靶板材料	
	D180K	A-G3	PE	A-U4G	XC48
密度/(g/cm ³)	18.0	2.65	0.92	2.8	7.823
冲击波速度/(m/s)	4029	5176	2187	5106	4797
屈服应力/GPa	2.5	0.265	0.038	0.43	0.72
雨果纽常数	1.24	1.35	1.48	1.35	1.49

表 2 A-3G 内芯材料 PELE 穿靶后剩余速度实验结果与计算结果

Tab. 2 The experimental residual velocity and the theoretical results for A-3G core material

靶板材料	靶板厚度/mm	实验实	实测靶	文献[10]	本文计算
		测初始速度/(m/s)	后剩余速度/(m/s)	计算靶后剩余速度/(m/s)	靶后剩余速度/(m/s)
A-U4G	3	929	914	916	919
		1275	1261	1257	1263
		2457	2444	2424	2438
	8	937	900	898	901
		1254	1208	1206	1215
		2472	2434	2384	2414
		2984	2945	—	2905
		925	895	890	905
XC48	3	1261	1231	1214	1237
		2441	2423	2352	2401

2.3 理论计算结果分析

从表 2、表 3 实验与计算结果的对比看,采用本文给出的 PELE 侵穿计算理论模型,计算所得结果与实验结果较为一致。在较低的速度下文献[13]运用一维线性波计算理论结果与实验结果也较为接近,但在较高速度下,本文计算结果优于一维线性波理论计算结果,在侵彻速度高于 2500m/s 时,线性波理论已经不能用于 PELE 的侵彻计算,且文献[13]未给出此条件下的计算结果,而本文理论计算结果仍能与实验结果一致。

对比表 2、表 3 中的计算与实验结果可见,在同一实验条件下,弹靶撞击速度较低时计算结果比实验结果偏高,撞击速度较高时计算结果比实验结果偏低。这是因为在较低的侵彻速度时,弹靶撞击产生的冲击波强度较低,塞块剪切力对冲击波强度的影响相对较大,计算中忽略了塞块剪切力的影响所致;在撞击速度较高时,冲击波强度较高,塞块剪切力对冲击波的影响相对较小,再者,在较高撞击速度下,靶板发生绝热剪切,靶板冲塞剪切局部温度升高,靶板材料软化,而计算中对靶板材料的抗剪强度采用了定值,高估了材料的抗剪能力所致。

表 3 PE 内芯材料 PELE 穿靶后剩余速度实验结果与计算结果

Tab. 3 The experimental residual velocity and the theoretical results for PE core material

靶板	实验实	实测靶	文献[10]	本文计算	
靶板	测初始	后剩余	计算靶后	靶后剩余	
材料	速度/	速度/	剩余速度/	速度/	
	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	
A-U4G	924	918	910	915	
	3	1279	1263	1260	
	2420	2394	2386	2402	
	8	939	887	898	905
	1258	1203	1207	1221	
	2445	2393	2353	2391	
	2977	2952	—	2902	
	936	889	899	918	
	XC48	3	1262	1206	1213
	2475	2462	2380	2438	

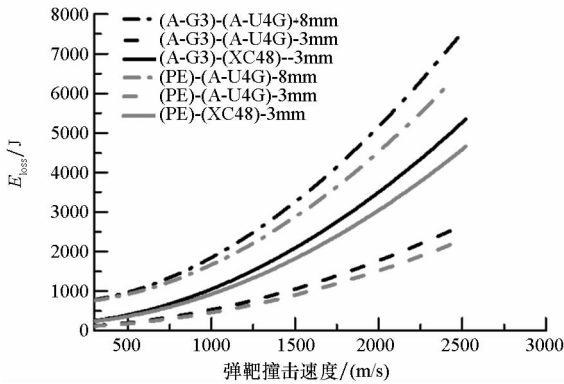


图 2 PELE 侵彻总能量损失随弹靶撞击速度的变化
Fig. 2 Change of total energy loss with the PELE variety impact velocities

通过对弹壳与弹芯质量的计算可知,对于两种不同内芯的 PELE,由于外壳材料的密度较高,是弹体质量的主要组成部分,内芯材料由 PE 换为 A-G3 弹体,质量增加量仅为 4.5%,因此,两种弹芯材料的 PELE 在相同的速度下,动能相差较小。图 2 依据式(9)~(16)给出了 A-G3、PE 两种内芯 PELE 弹体侵彻不同靶板后总能量损失与撞击速度间的关系。由图 2 可见,影响 PELE 侵彻能量损失的主要因素是靶板的材料性质,内芯材料力学性能及密度在一定范围内的改变对 PELE 侵彻能力的影响较小。

图 3 依据式(15)给出了多种实验条件下

PELE 外壳内沿剪切能耗在弹体损失总能量中的比值,图中 E_{loss} 为弹体侵彻总能量损失。从图 3 中可以看出,该比值在所有实验工况下,均随弹体速度的增加先迅速增大,而后减小,且 A-G3 内芯小于 PE 内芯,最大值为 PE 内芯 PELE 侵彻 8mm 厚 A-U4G 靶,此剪切能耗与弹体侵彻过程中的总能量损失的最大比值仅为 1.6%,因此,外壳前端内沿剪切能,可在 PELE 侵彻靶板的总能量损失计算中忽略不计。

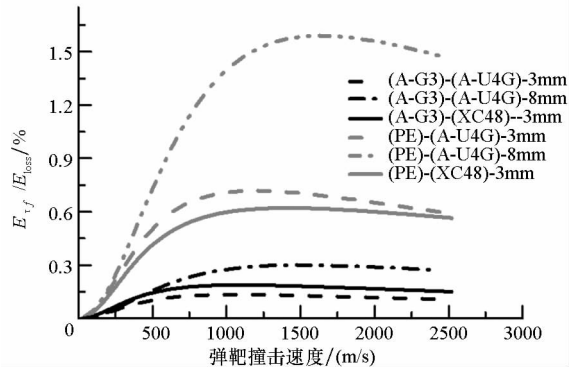


图 3 PELE 外壳内沿剪切靶板耗能与弹体损失总能量之比随弹靶撞击速度的变化
Fig. 3 Change of the ratio of the inner edge shear energy loss of PELE shell over the projectile total energy loss with the variety impact velocities

图 4 依据式(11)~(12)给出了 PELE 侵彻过程中,靶板塞块获得总能量与弹体侵彻总能量损失之比随弹丸撞击速度变化的情况;从图中可以看出,该能量所占比例随撞击速度升高先迅速增大,而后趋于一个常值;对于薄靶相对厚靶剪切耗能较小,塞块获得的能量在弹丸侵彻能量损失中所占比重较大,最大为总能耗的 75%。塞块获得的总能量是弹靶撞击中,弹体动能损失最主要的组成部分。

PELE 侵彻靶板过程中轴向压缩储存的压缩势能是其靶后外壳破片径向飞散能量的来源;图 5 依据式(13)、式(14)给出了 PELE 弹体与内芯轴向压缩势能随弹靶撞击速度的变化情况;从图中可以看出该能量主要受弹芯材料和靶板材料及靶板厚度的影响;靶板材质相同的情况下,A-G3 内芯材料的 PELE 轴向压缩能量高于 PE 内芯材料 PELE;相同厚度不同材质靶板情况下,XC48 靶板对弹体轴向压缩能高于 A-U4G 靶板;由此可以推断,在一定范围内,密度较高内芯的 PELE 在侵彻密度较高的靶板时,靶后会形成较高径向速度的外壳破片。

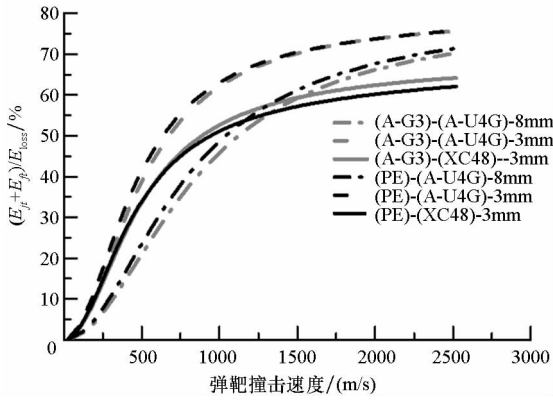


图4 PELE 侵彻靶板过程中塞块获得总能量与弹体损失总能量之比随弹靶撞击速度的变化
Fig. 4 Change of the ratio of the plug gain energy over the projectile total energy loss with the variety impact velocities

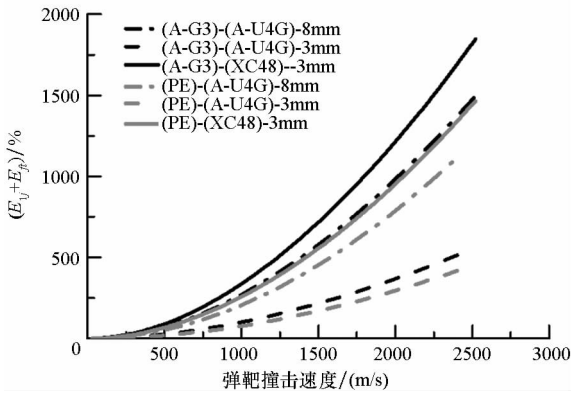


图5 PELE 侵彻靶板过程中弹体压缩能量随弹靶撞击速度的变化

Fig. 5 Change of the compressible energy of projectile in the penetrating process with the variety impact velocity

3 结论

1) 本文依据一维平面冲击波理论建立的PELE 侵穿薄靶的计算理论可以用于 PELE 侵彻薄靶板后轴向剩余速度的分析,且撞击速度在3000m/s 以下均与实验结果较吻合。

2) PELE 侵彻过程中,靶板塞块获得的能量在弹体侵彻动能损失中比重最大;外壳前端内沿对靶板的剪切能耗所占比例较小,可以忽略。

3) PELE 对金属薄靶板的侵彻能力主要受弹丸初速,外壳密度和靶板材料性质的影响;内芯材料的力学性能及密度在一定范围内改变对 PELE 弹侵彻能力的影响较小,分析时可以忽略内芯材料变化对 PELE 侵彻能力的影响。

4) PELE 内芯密度在一定范围内其值越高,侵彻的靶板密度越高,外壳靶后形成的破片径向

速度越高。

参考文献 (References)

[1] Paulus G, Chanteret P Y, Wollmann E. PELE: a new penetrator concept for generating lateral effects[C]// Proceedings of 21st International Symposium, Ballistics Adelaide, Australia, 2004;104 - 110.

[2] Kesberg G, Schirm V, Kerk St. PELE: the future ammunition concept [C]//Proceedings of 21st International Symposium , Ballistics Adelaide, Australia; IBC, 2004; 1134 - 1144.

[3] 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)

[4] 涂胜元,沈晓军,王军波,等. 着速和靶厚对钢弹体 PELE 侵彻后效影响的试验研究[J]. 弹箭与制导学报,2010, 30(3): 69 - 71.
TU Shengyuan, SHEN Xiaojun, WANG Junbo, et al. Research on the influence of impact velocity and thickness of RHA on the penetration after effect of steel shell PELE by experiment [J]. Journal of Projectiles Rockers Missiles and Guidance, 2010,30(3): 69 - 71. (in Chinese)

[5] 杜忠华,宋丽丽. 横向效应增强型侵彻体撞击金属薄板理论模型[J]. 南京理工大学学报,2011, 35(6): 822 - 826.
DU Zhonghua, SONG Lili. Theoretical model of penetrator with enhanced lateral effect impacting thin metal target [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2011,35(6):822 - 826. (in Chinese)

[6] 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.

[7] 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)

[8] 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)

[9] 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)

[10] 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.
- [11] 晏麓晖, 曾首义, 周建平. 穿甲子弹垂直侵彻防弹钢试验与理论模型[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(4): 33 - 38.
YAN Luhui, ZENG Shouyi, ZHOU Jianping. Experiment and theoretical model of high-strength armor normally penetrated by armor-piercing bullet[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(4): 33 - 38. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] 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)
- [14] Paulus G, Schirm V. Impact behavior of PELE projectiles perforating thin target plates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 33(1-2): 566 - 579.
- [15] 朱建生, 赵国志, 杜中华, 等. PELE 垂直侵彻薄靶板的机理分析[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(3): 281 - 288.
ZHU jiansheng, ZHAO Guozhi, DU Zhonghua, et al. Mechanism of PELE projectiles perpendicularly impacting on thin target plates [J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(3): 281 - 288. (in Chinese)
- [16] 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: 72 - 73.
ZHANG Guowei. Terminal effect and experiment of shooting range [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009: 72 - 73. (in Chinese)
- [17] 汤文辉. 冲击波物理[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 180 - 192.
TANG Wenhui. Shock wave physics [M]. Beijing: Science Press, 2011: 180 - 192. (in Chinese)
- [18] 谭华. 实验冲击波物理导引[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 18 - 19.
TAN Hua. Introduction to experimental shock-wave physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 18 - 19. (in Chinese)
- [19] Woodward R L, De Morton M E. Penetration of targets by flat-ended projectiles [J]. International Journal of Mechanics Science, 1976, 18(3): 119 - 127.
- [20] 钱伟长. 穿甲力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984: 327 - 328.
QIAN Weichang. Mechanics of penetration [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984: 327 - 328. (in Chinese)