文章编号：1000-5773(2012)04-0449-06

入射速度对长杆弹垂直侵彻行为的影响规律*

高光发[1,2,3]，李永池[2,3]，沈玲燕[2,3]，郭　扬[2,3]

(1.安徽理工大学能源与安全学院，煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室，安徽淮南　232001；
2.中国科学技术大学近代力学系，安徽合肥　230027；
3.中国科学院材料力学行为和设计重点实验室，安徽合肥　230027)

摘要：以长杆弹垂直侵彻半无限厚靶板为研究对象，分析了弹体最大侵彻深度与入射速度的关系，研究了弹体入射速度对侵彻最大深度的影响规律。研究表明：靶板的强度和界面效应使弹体在侵彻过程中存在一个临界速度，当入射速度大于临界速度时，弹体的侵彻才能通过开坑阶段进入准稳定阶段，它是造成当入射速度较小时侵彻深度随入射速度的提高而几乎不变或缓慢增加的主要原因；准稳定侵彻过程中弹体速度和侵彻速度基本不变，并且两者存在线性关系，这种关系只与弹体和靶板的材料性能有关，是造成当入射速度较大时侵彻深度随入射速度的提高呈快速线性增大的主要原因。

关键词：侵彻；长杆弹；侵彻速度；侵彻深度

中图分类号：O385；TJ760.1　　**文献标识码**：A

1　引　言

长杆弹是当前穿甲弹和钻地弹的主要弹型，如何提高长杆弹的侵彻深度一直是长杆弹设计者研究的重要问题之一。影响长杆弹侵彻深度的因素很多，其中入射速度是影响长杆弹侵彻半无限厚靶板的重要因素之一，也是最关键的因素，这一点在所有长杆弹侵彻研究中都得到了验证。从 Anderson 等人[1-2]的实验数据中可以看出，在一定入射速度范围内，长杆弹垂直侵彻半无限靶板时弹体的侵彻深度几乎与入射速度呈线性关系，也就是说，当弹体和靶板的材料参数和几何参数不变时，长杆弹的垂直侵彻深度随着弹体入射速度的提高而增加。然而，侵彻深度并不能随弹体入射速度的提高而无限增加。实验表明，当其它条件不变、入射速度提高到一定值时，弹体的侵彻速度达到最大值，此时若再提高弹体的入射速度，侵彻深度的改变并不明显，而是无限接近一个恒定值[2]。

本研究针对长杆弹垂直侵彻半无限厚靶板的侵彻行为，分析弹体入射速度的影响规律及其原因。研究结果可为长杆弹及抗侵彻靶板(装甲或防护工事)的设计提供一定的参考。

2　侵彻开坑阶段对侵彻深度的影响分析

根据长杆弹垂直侵彻半无限厚靶板过程的特征，可将其划分为 3 个阶段：开坑阶段、准稳定阶段和结束阶段。其中结束阶段是造成弹体长径比对归一化侵彻深度产生影响的主要原因[3]。

对于长杆弹侵彻的开坑阶段，结合 Anderson 等人[4]的研究结果可知：(1) 当弹体刚接触靶板时，弹

* **收稿日期**：2010-10-17；**修回日期**：2011-02-21

基金项目：武器装备探索研究(7131013)；国家自然科学基金(50802092)；中国博士后科学基金(2011M501394)；安徽理工大学博士基金(2011yb007)；安徽省自然科学基金(1208085QE86)；安徽省高校省级优秀青年人才基金(2012SQRL049ZD)

作者简介：高光发(1980－)，男，博士，副教授，主要从事冲击动力学研究. E-mail：gfgao@ustc.edu.cn

头速度瞬间接近于零,此时在弹头产生强压缩波并储存大量的弹性能,弹尾速度因压缩波未传递到弹体尾部,仍保持原有速度;(2) 当第 1 轮压缩波到达弹尾时,弹尾速度因反射拉伸波的作用呈现下降趋势,同时向弹头方向传播拉伸波,由于靠近弹头部分的弹体受到较大的压缩且越靠近弹头压缩程度越大,使得弹体成为从弹头到弹尾波阻抗逐渐降低的梯度材料,所以弹体中的应力波反射场非常复杂,致使弹体各部分速度出现振荡现象;(3) 当弹头向后方反射压缩波、并且弹尾反射的拉伸波不足以抵消弹体中储存的压缩能和动能时,靶板出现坑洞,弹头速度得以增加,周而复始,当弹体中的应力均匀时,弹头、弹尾的速度逐渐相等,从而以近似匀速地向靶板内部侵彻,即侵彻过程进入准稳定阶段。

由高光发[3]、Anderson[4]等人的研究结果可知:在侵彻过程中的开坑阶段,单位侵彻深度的能量损耗率一般比其它两个阶段大,相当于一个临界能量,即当弹体入射能量超过该临界能量时,侵彻进入能量损耗率相对较少的准稳定阶段,否则就会出现不能侵彻进入靶板的情况。因此,对于确定的弹体和靶板而言,长杆弹垂直侵彻半无限厚靶板存在 3 种情况:(1) 弹体的入射速度过小,弹体动能小于开坑所需的临界能量,此时弹体的侵彻深度接近于零;(2) 弹体的入射速度较小,弹体动能大于开坑所需的临界能量,但当进入准稳定阶段时,弹体能量所剩无几,侵彻深度不大,此时提高入射速度虽然能够增加弹体的侵彻深度,但是增加速度缓慢;(3) 弹体的入射速度足够大,弹体动能远大于开坑所需的临界能量,弹体的绝大部分能量用于准稳定阶段,弹体的侵彻深度较大,此时提高入射速度会使弹体侵彻深度增加得更快。这也就是为何当入射速度较低时提高入射速度后弹体侵彻深度增加缓慢但入射速度达到一定值时却增加很快的原因。

3 侵彻准稳定过程中弹体平均速度与侵彻速度的关系

侵彻过程的主要阶段是第 2 阶段,即准稳定阶段,最终的侵彻深度在很大程度上由该阶段决定。93W 合金长杆弹垂直侵彻半无限 4340 钢靶的研究结果表明,当入射速度足够大、且长径比达到一定值(30)时,90%以上的侵彻深度在准稳定阶段完成[5]。

若不考虑开坑阶段和结束阶段,侵彻行为可用改进的流体动力学理论进行解释。按照该理论,在长杆弹垂直侵彻过程中,弹体的平均速度与侵彻速度之间满足线性关系,即

$$u = a + bv = \frac{v}{1 + (\rho_t/\rho_p)^{1/2}} \tag{1}$$

式中:ρ_t、ρ_p 分别为靶板和弹体密度;u 为准稳定过程中弹体的侵彻速度,即单位时间内的侵彻深度,也就是弹坑的侵蚀速度;v 为准稳定过程中弹体的平均速度,即单位时间内弹体沿侵彻方向上的平移距离,即侵彻过程中弹体尾部的平均速度。研究表明,靶板强度对弹体的侵彻深度有不可忽视的影响,并且当侵彻速度不是超高速时,弹体强度也应考虑。因此,综合考虑弹体开坑阶段的影响和弹体靶板强度,(1)式中的系数 a 和 b 值得商榷。Orphal 等人[6]通过分析实验数据发现,弹体速度与侵彻速度之间虽满足线性关系,但却与(1)式迥然不同。

本研究针对 93W 合金长杆弹垂直侵彻半无限 4340 钢靶的侵彻行为,对其侵彻过程中准稳定阶段的特征以及期间弹体的平均速度与侵彻速度之间的关系进行研究。

3.1 模型与参数的选取及验证

采用通用的商业有限元软件进行三维数值仿真,其中长杆弹直径取 0.4 cm,长径比分别取 5、10、15,每种模型中弹体入射速度分别取 1.5、2.0、2.5、3.0 km/s,共 12 个模型。研究中取 1/4 模型进行分析,对称面定义为反对称约束,靶板边界和底面定义为无反射边界,单元采用 8 节点六面体单元。弹体为 93W 合金,靶板材料为 4340 钢。材料的本构模型为 Johnson-Cook 模型,状态方程采用 Grüneisen 方程,失效判据采用损伤度判据和等效塑性应变判据。为了能够与实验进行对比验证,模型采用的材料与 Anderson 等人[3]的实验材料相同,如表 1 所示。表 1 中:A、B、C、n、m 为 Johnson-Cook 模型中的材料参数,$D_1 \sim D_5$ 为材料失效参数,ρ_0 为材料的初始密度,c 为声速,S_1 为冲击波速度-质点速度曲线拟合系数,γ_0 为 Grüneisen 参数,a 为 γ_0 的修正系数。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

Materials	A/(MPa)	B/(MPa)	n	C	m	D_1	D_2	D_3
93W	1 506	177	0.12	0.016	1.00	0.16	3.13	−2.04
4340 steel	1 189	765	0.26	0.014	1.03	0.05	3.44	−2.12
Materials	D_4	D_5	ρ_0/(g/cm^3)	c/(m/s)	S_1	γ_0	a	
93W	0.007	0.37	17.6	3 850	1.44	1.58		
4340 steel	0.002	0.61	7.83	4 578	1.33	1.67	0.47	

为了验证模型与参数的合理性,将数值仿真得到的归一化侵彻深度(侵彻深度与弹体长度之比,即 P/L)与 Anderson 等人[5]由经验公式得到的计算结果进行对比,如表 2 所示,其中 v_0 为冲击速度。从表 2 中可以看出,本研究采用的本构模型、几何模型和相关参数是合理、可靠的。

表 2 归一化侵彻深度的实验结果和数值计算结果

Table 2 Numerical and experimental results of the normalized penetration depth

v_0/(km/s)	$(P/L)_{num}$	$(P/L)_{exp}$	Relative error/(%)	v_0/(km/s)	$(P/L)_{num}$	$(P/L)_{exp}$	Relative error/(%)
1.5	0.81	0.78	3.7	1.7	0.96	0.98	2.0
1.6	0.89	0.88	1.1	1.8	1.03	1.08	4.8

3.2 侵彻过程中的速度特征

Anderson 等人[5]的研究表明:在长杆弹侵彻过程中,对于不同长径比的长杆弹,开坑阶段和结束阶段的侵彻深度基本相同,侵彻深度主要由准稳定侵彻过程决定。因此,本研究以计算出的弹体速度时程曲线为依据,针对侵彻 20 μs 后的一段过程(弹体速度变化很小)的速度特征进行分析。

由于在侵彻过程中弹体振动比较剧烈,侵彻速度的波动很强烈,此外还有应力波的影响,因此很难获得光滑速度曲线。为了更好地研究侵彻过程规律,本研究先确定弹体的位移及侵彻位移时程曲线,然后在分析统计的前提下总结速度规律。

图 1 为弹体长径比为 5、10、15 且入射速度分别为 1.5、2.0、2.5、3.0 km/s 时弹体的位移和侵彻深度(即弹坑底部最低点的位移)时程曲线。可以看出:弹体的位移和弹坑最低点的位移随时间的推移呈现明显的线性关系,即在侵彻准稳定过程中弹体的平均速度和侵彻速度基本不变,而且随着长径比和入射速度的增加,曲线的线性规律愈加明显。这说明:在侵彻准稳定过程中,弹体的动能损失以质量损失(长度损失)为体现形式,这与 Anderson 等人[7]的实验结果吻合。从图 1 还可以看出:当长径比一定时,不同入射速度下位移时程曲线的斜率不同,即入射速度不同时弹体的平均速度和侵彻速度不同。通过对图 1 中的数据进行整理,得到了不同入射速度、不同长径比下弹体的平均速度和侵彻速度,结果列于表 3。

表 3 弹体平均速度与侵彻速度

Table 3 Penetrator velocity and penetrating velocity

L/D	v_0/(km/s)	v/(km/s)	u/(km/s)	L/D	v_0/(km/s)	v/(km/s)	u/(km/s)
5	1.5	1.372	0.615	10	2.5	2.430	1.373
5	2.0	1.823	1.016	10	3.0	2.920	1.668
5	2.5	2.295	1.390	15	1.5	1.454	0.635
5	3.0	2.682	1.617	15	2.0	1.964	1.027
10	1.5	1.444	0.677	15	2.5	2.417	1.395
10	2.0	1.945	1.033	15	3.0	2.907	1.729

3.3 侵彻速度与弹体平均速度的关系

分析表 3 中的数据可知:长杆弹垂直侵彻时,准稳定过程中弹体的平均速度和侵彻速度之间满足线性关系,如图 2 所示。虽然在不同长径比或不同入射速度条件下,弹体的平均速度和侵彻速度会发生明显的变化,但是从图 2 中可以看出,当弹体以 1.5～3.0 km/s 的速度侵彻靶板时,侵彻速度与弹体平均速度之间的关系并没有随着长径比和入射速度的变化而改变,而是满足同一个线性关系,即

$$u = -0.365 + 0.723v \tag{2}$$

式中:u、v 的单位为 km/s。此研究结果与 Orphal 等人[6]的研究结论具有一定的相似性。(2)式中的系数只与弹体和靶板的材料参数有关,与弹体的长径比和入射速度无关。

对于本研究中的材料而言,根据(1)式有

$$u = 0.6v \tag{3}$$

(2)式、(3)式的差异说明:当弹体以 1.5～3.0 km/s 的速度侵彻靶板时,弹体和靶板的强度对最大侵彻深度有较大影响,因此计算时应予以考虑;对于具有一定强度的靶板,弹体速度须超过一定值,才能进入侵彻准稳定阶段,进而形成有效侵彻,这与第 2 节的分析结果一致。

对(2)式进行变换,可得到

$$v - u = 0.365 + 0.277v \tag{4}$$

(4)式说明:在侵彻的准稳定阶段,弹体的销蚀速度与弹体的平均速度呈线性关系,即随着入射速度增加,弹体的销蚀速度不断加快,这与 Anderson 等人[7]的研究结果一致。

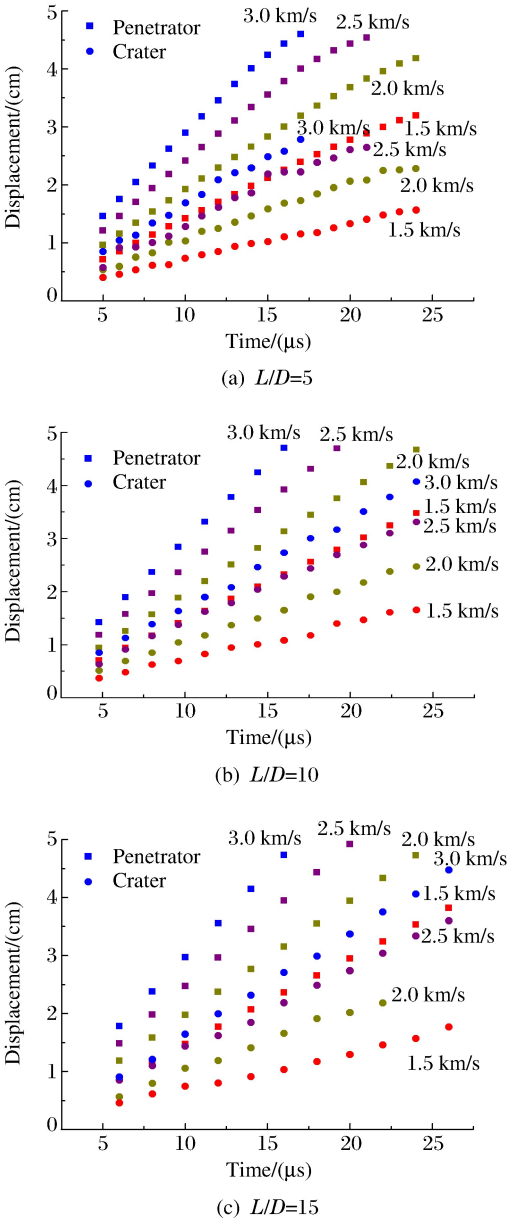


图 1 不同条件下弹体位移-时间关系

Fig. 1 Displacement of penetrator versus time under different conditions

3.4 弹体侵彻深度与弹体平均速度的关系

由(2)式可知,弹体必须具备一定能量才能在准稳定过程中进行稳定侵彻,弹体侵彻时质量因销蚀而不断减小,此时可假设弹体的截面积保持不变,则在侵彻过程中弹体的长度以恒定速度减小,直到弹体的动能小于一定值时停止侵彻。

假设长杆弹的初始长度为 $L_0=12$ cm,已知弹体在准稳定过程中的平均速度 $v_0=1.5$ km/s 时,侵彻深度 $P_0=14$ cm(此为准稳定过程中的侵彻深度,不包括开坑阶段和结束阶段),根据(2)式和(4)式可计算出停止侵彻时的长度 L,即

$$L = L_0 - \frac{P_0(0.365 + 0.277v_0)}{-0.365 + 0.723v_0} \tag{5}$$

于是,对于任意速度 v_1,由于弹体停止侵彻的临界动能不变,则此时弹体停止侵彻时的侵彻深度 P_1 为

$$P_1 = (-0.365 + 0.723v_1)\frac{L_0 - L(v_0/v_1)^2}{0.365 + 0.277v_1} \tag{6}$$

利用(2)式、(4)式～(6)式,对弹体平均速度分别为 1.5～2.5 km/s 时的侵彻深度进行计算,结果如

图 3 所示。可见，在侵彻准稳定阶段，弹体的侵彻深度随弹体平均速度的提高呈近似线性递增趋势，这也就是文献[2]中当入射速度大于 1 km/s 时弹体的侵彻深度与入射速度保持近似线性关系的原因。

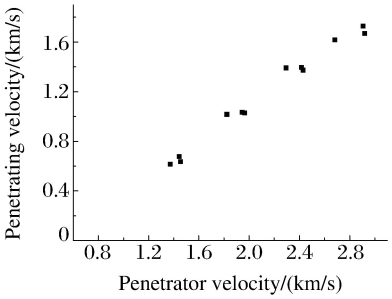


图 2　准稳定过程中弹体侵彻速度与弹体平均速度的关系

Fig. 2　Penetrating velocity versus penetrator velocity in the quasi-steady stage

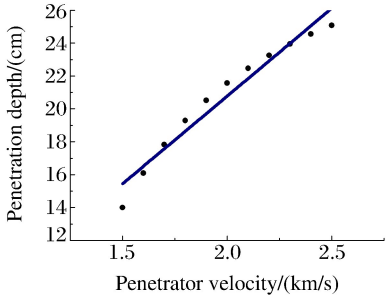


图 3　准稳定过程中侵彻深度与弹体速度的关系

Fig. 3　Penetration depth versus penetrator velocity in the quasi-steady stage

4　结　论

通过对 93W 长杆弹垂直侵彻半无限厚 4340 钢靶板进行数值计算，研究了长杆弹侵彻半无限厚靶板时弹体入射速度对归一化侵彻深度的影响，得到了如下结论。

(1) 侵彻过程中存在 3 个主要阶段：开坑阶段、准稳定阶段和结束阶段。当其它参数固定时，长杆弹的侵彻深度随着入射速度的提高而增加。当弹体入射速度小于一定值时，由于开坑阶段的界面效应，使得小于临界能量的弹体无法对靶板进行有效侵彻，即此时的侵彻深度接近于零。

(2) 当弹体的入射速度大于最低临界值但还相对较小时，弹体虽然对靶板进行了有效侵彻，但是在完成开坑阶段进入准稳定阶段后，弹体能量所剩无几，不足以进行强有力的侵彻，此时弹体的侵彻深度虽然随着入射速度的提高而增加，但是其增加速度相对较小，且一般为非线性。

(3) 当弹体的入射速度足够大时，弹体完成开坑阶段的能量损失可忽略，大部分能量在准稳定阶段消耗，此时弹体的侵彻深度不仅随入射速度的提高而增加，并且增加速度较大且恒定。

(4) 侵彻准稳定过程中侵彻速度和弹体平均速度不变，且两者之间存在线性关系，这种关系只与弹体和靶板材料的力学性能有关，与长径比、入射速度等因素无关。

References：

[1] Anderson C E, Morris B L Jr. The ballistic performance of confined Al_2O_3 ceramic tiles [J]. Int J Impact Eng, 1992, 12(2): 167-187.

[2] Walker J D, Anderson C E. A time-dependent model for long-rod penetration [J]. Int J Impact Eng, 1995, 16(1): 19-48.

[3] Gao G F, Li Y C, Huang R Y, et al. Study on effect mechanism of aspect ratio for vertical penetration of a long-rod projectile [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(4): 327-332. (in Chinese)
高光发，李永池，黄瑞源，等. 长径比对长杆弹垂直侵彻能力影响机制的研究 [J]. 高压物理学报，2011，25(4)：327-332.

[4] Anderson C E, Walker J D. An analytical model for dwell and interface defeat [J]. Int J Impact Eng, 2005, 31(9): 1119-1132.

[5] Anderson C E, Walker J D, Bless S J, et al. On the velocity dependence of the L/D effect for long-rod penetrators [J]. Int J Impact Eng, 1995, 17(1): 13-24.

[6] Orphal D L, Anderson C E. The dependence of penetration velocity on impact velocity [J]. Int J Impact Eng, 2006,

33(1):546-554.

[7] Anderson C E, Hohler V, Walker J D, et al. Time-resolved penetration of long rods into steel targets [J]. Int J Impact Eng, 1995, 16(1): 1-18.

Effect of Impact Velocity on the Penetration Behavior for Long-Rod Penetrator Vertically Penetrating Semi-Infinite Target

GAO Guang-Fa[1,2,3], LI Yong-Chi[2,3], SHEN Ling-Yan[2,3], GUO Yang[2,3]

(1. *Key Laboratory of Safe and Efficient Mining Cosponsored by Anhui Province and Ministry of Education, School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan* 232001, *China*;
2. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *China*;
3. *CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Hefei* 230027, *China*)

Abstract: This study is aimed at the relation between maximal penetration depth and impact velocity for a long-rod penetrator vertically penetrating a semi-infinite target. The effects of impact velocity on the maximal penetration depth are obtained by numerical simulation. The results show that the threshold velocity exists in the process of penetrating due to the target strength and the interfacial effect, and the penetration enters into the quasi-steady stage from the dwelling stage only as the impact velocity of the penetrator is beyond this value, which is the key reason why the penetration depth does not change or increases extremely slowly with increasing impact velocity when the impact velocity is small compared with the threshold velocity. The penetrator velocity and penetrating velocity are close to a constant in the quasi-steady stage, and the positive linear relation between them is only related to the strength properties of the penetrator and the target, which is the main reason why the penetration depth linearly increases quickly with the impact velocity increasing when the impact velocity is beyond this threshold velocity.

Key words: penetration; long-rod penetrator; penetrating velocity; penetration depth