文章编号：1000-5773(2011)04-0327-06

长径比对长杆弹垂直侵彻能力影响机制的研究*

高光发[1,2,3]，李永池[2]，黄瑞源[2]，段士伟[2]

(1. 安徽理工大学能源与安全学院，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. 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)

摘要：以长杆弹垂直侵彻半无限靶为研究对象，利用量纲理论，分析了影响侵彻深度的主要因素，采用经验公式和数值仿真对长杆弹侵彻机理进行了系统研究。结果表明：要达到同样的侵彻效率，长径比的增加会增大单位侵彻深度所耗的能量密度；对于具有相同体积的不同弹体，侵彻深度随长径比增加而增大，直至达到某一最大值。研究发现，造成这种现象的主要原因是侵彻过程中后续不稳定阶段产生的漏斗形弹坑和高温影响弹体侵彻，虽然交界面对侵彻深度的影响较大，但与长径比对侵彻效率的影响无明显关系。

关键词：侵彻；长径比；侵彻效率；侵彻深度
中图分类号：O385 **文献标识码**：A

1 引 言

长杆弹侵彻问题在过去几十年内得到了广泛深入的研究。为了更方便地研究侵彻问题，一般把长杆弹垂直侵彻半无限靶板时的侵彻深度与侵彻体长度之比定义为侵彻效率。研究表明，影响侵彻效率的因素很多，如侵彻体的密度、长度、直径、弹性模量、泊松比、等效屈服强度、侵彻速度，靶板的密度、弹性模量、泊松比、等效屈服强度等[1-2]。对于同种材料的弹体和靶板，影响因素主要为弹体长度、直径和速度。其中，长杆弹长径比对侵彻效率的影响得到了许多学者的关注。研究表明：在长径比较小或大于10的情况下，长径比的影响不可忽视；在一般情况下，侵彻效率随长径比增加而减小[2-6]。然而，有的学者对这一规律存在一定的误解，认为杆径越大侵彻越深[7]，事实并非如此。在一定范围内，长径比越大，侵彻效率越小，侵彻深度越大。但是，对于弹坑等方面的研究，采用侵彻效率随长径比增加而减小这种解释，在很大程度上能够更好地说明问题，并且，弹坑只是侵彻结果，不能从本质上阐明侵彻过程。

本研究以 93W 长杆弹垂直侵彻半无限 4340 钢靶板为研究对象，结合已有实验数据，利用数值计算软件进行数值仿真，系统深入分析长径比对侵彻效率和侵彻深度的影响。

2 侵彻参数与长径比的关系

影响长杆弹侵彻深度的因素很多，从现阶段国内外研究结果[2-6]来看，影响侵彻深度 P 的主要因素有：侵彻体的密度 ρ_p、弹性模量 E_p、泊松比 ν_p、长度 L_p、直径 D_p、等效屈服强度 σ_p、侵彻速度 v_p 以及靶板的密度 ρ_t、弹性模量 E_t、泊松比 ν_t、等效屈服强度 σ_t。因此，可用如下公式进行表述

$$P = f(L_p, D_p, v_p, \rho_p, \sigma_p, E_p, \nu_p; \rho_t, \sigma_t, E_t, \nu_t) \tag{1}$$

* **收稿日期**：2010-04-06；**修回日期**：2010-09-04
基金项目：国家自然科学基金重点项目(10632080)；国防科技重点实验室基金(51453030205ZK0101)
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@mail.ustc.edu.cn
通讯作者：李永池(1941－)，男，教授，博士生导师，主要从事冲击动力学研究. E-mail：ycli@ustc.edu.cn

(1)式中的基本量纲只有 3 个。利用量纲理论,以 ρ_p、L_p 和 σ_t 为基本参数,有

$$P/L_p = f(\nu_p,\nu_t;L_p/D_p,\rho_p v_p^2/\sigma_t,E_p/\sigma_t,\sigma_p/\sigma_t;\rho_t/\rho_p,E_t/\sigma_t) \tag{2}$$

对特定的弹体材料和靶板材料而言,(2)式可简化为

$$P/L_p = f(L_p/D_p,\rho_p v_p^2/\sigma_t) \tag{3}$$

由(3)式可知,对于特定材料的长杆弹和靶板,如果长径比和入射速度相同,则侵彻效率相同。Anderson等人[5-6]通过实验总结出了 93W 弹(弹速为 0.75～1.90 km/s)侵彻 4340 钢靶板时侵彻效率与长径比、入射速度之间的关系

$$P/L = -0.209 + 1.044v/v_r - 0.194\ln(L/d) \tag{4}$$

式中:L 为入射杆长度;d 为弹体直径;v 为入射速度;v_r 为参考速度,v_r=1.0 km/s。

2.1 等侵彻效率时长径比与能量密度比的关系

设有两个相同材料和直径、不同长度的 93W 弹(密度为 17.6 g/cm^3)以相同入射速度对 4340 钢靶板进行侵彻,若弹体的侵彻效率相同,则由(3)式和(4)式可知

$$17\,431.81\ln(L_2/L_1) = (\rho v_2^2/2)^{1/2} - (\rho v_1^2/2)^{1/2} = e_1^{1/2}[(e_2/e_1)^{1/2} - 1] \tag{5}$$

式中:$e=\rho v^2/2$ 为单位体积介质的动能,即能量密度。对入射速度为 1.0～1.8 km/s、不同长径比的长杆弹侵彻靶板时所耗的能量密度,即能量利用率,进行统计分析,如图 1 所示。可以看出:(1) 在侵彻效率相同的条件下,随着弹体长径比增加,所需的能量密度增加,即单位侵彻深度的单位体积弹体动能能耗增加,也就是说,长径比大的弹体达到同样的侵彻效率需要更大的动能能量密度;(2) 随着弹体长径比增加,单位侵彻深度的动能能耗增加速率逐渐减小;(3) 在相同长径比、相同侵彻效率的条件下(本研究中长径比须大于 1),入射速度越大,所耗能量密度越小。

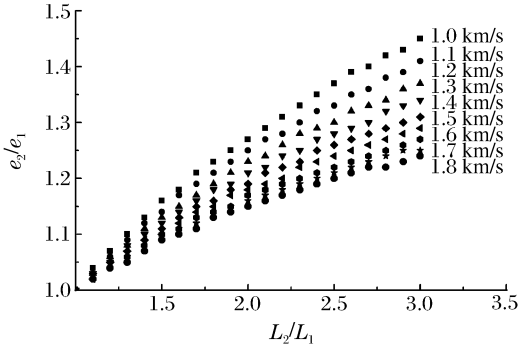


图 1 不同速度下 e_2/e_1 与 L_2/L_1 的关系

Fig. 1 e_2/e_1 versus L_2/L_1 for various incoming velocities

2.2 等动能时长径比与侵彻深度的关系

利用 93W 弹体和 4340 钢靶板,在等动能条件下对长径比与侵彻深度之间的关系进行分析。若两种弹体的入射速度相等,则由等动能条件,两种弹体的体积 V 相同,此时侵彻深度比为

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{[-0.209 + 1.044(v/v_r) - 0.194\ln(L_2/D_2)](L_2/D_2)^{2/3}}{[-0.209 + 1.044(v/v_r) - 0.194\ln(L_1/D_1)](L_1/D_1)^{2/3}} \tag{6}$$

令 D_1=0.4 cm,侵彻深度与长径比之间的关系如图 2 所示。从图 2 可以看出:(1) 对体积和入射速度都相等的的侵彻体,随着弹体长径比增大,侵彻深度逐渐增大,但增大速度逐渐减小,直至达到最大值,最后,随着长径比增大,侵彻深度逐步减小;(2) 当长径比相同时,入射速度越大,侵彻深度越大,并且,这种现象在长径比越大时越明显;(3) 在体积和入射速度一定的条件下,总能找到一个长径比使侵彻深度达到最大值,而且,入射速度越大,相应的长径比越大。

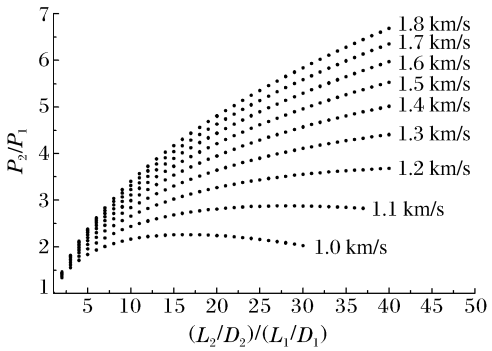


图 2 不同速度下 P_2/P_1 与 $(L_2/D_2)/(L_1/D_1)$ 的关系

Fig. 2 P_2/P_1 versus $(L_2/D_2)/(L_1/D_1)$ for various incoming velocities

3　长径比影响机理的数值研究

侵彻效率随长径比增加而增大这一现象在许多年前就被注意到。起初,主要针对的是长径比小于10的长杆弹。随着研究的深入,发现对于长径比大于10的长杆弹,其长径比的影响也非常大。本研究针对93W长杆弹垂直侵彻半无限4340钢靶板,深入研究侵彻效率的影响因素。这里从3方面进行分析:弹体自身的影响、弹体与靶板接触界面的影响、弹体在靶板中侵彻过程的影响。

为了深入研究这3方面的影响,采用有限元软件进行三维数值仿真。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,采用8节点六面体单元。采用5种模型分别进行数值模拟,如图3所示。

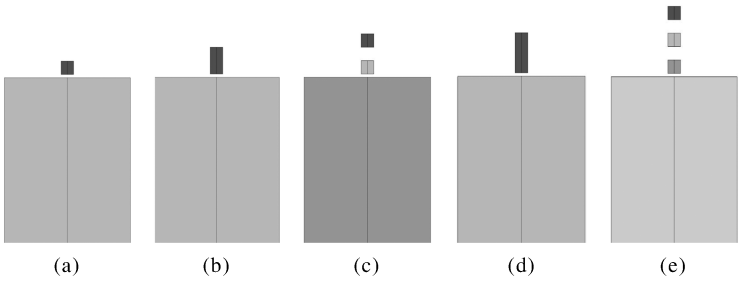


图3　侵彻模型示意图

Fig. 3　Penetration models

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[8]。为了能够与实验进行对比验证,模型采用的材料参数[9-11]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～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	

为了验证模型和参数的可靠性,对长径比为20(长8 cm、直径0.4 cm)和16(长8 cm、直径0.5 cm)的93W长杆弹垂直侵彻4340钢靶进行数值计算,弹体侵彻效率的计算结果列于表2。可以看出,数值计算结果与Anderson等人[5-6]的实验数据吻合较好,说明本研究采用的模型和参数是合理准确的。

表2　侵彻效率的数值计算结果和实验结果

Table 2　Numerical simulation and experimental results of penetration efficiencies

Incident velocity/(km/s)	$(P/L)_{calc}$		$(P/L)_{exp}$[5-6]	
	$L/D=20$	$L/D=16$	$L/D=20$	$L/D=16$
1.5	0.81	0.85	0.78	0.82
1.6	0.89	0.94	0.88	0.93
1.7	0.96	0.98	0.98	1.02
1.8	1.03	1.07	1.08	1.13

3.1　弹体自身的影响

5种侵彻模型的数值计算结果如表3所示。从表中可以看出:若将长径比为2的弹体换为2个长

径比为 1 的弹体进行侵彻，前者的侵彻深度和侵彻效率明显低于后者；同样，将长径比为 3 的弹体换为 3 个长径比为 1 的弹体进行侵彻时，前者的侵彻深度和侵彻效率也明显低于后者。此外，这 4 种情况下的侵彻效率明显低于 1 个长径比为 1 的弹体的侵彻效率，并且随着长径比增加，侵彻效率的差异越来越小。这说明：虽然长径比较大的弹体侵彻时弹体中产生的高温和应力波对弹体后部造成影响进而导致侵彻效率降低，但是随着长径比增加，影响并不大，所以当长径比大于 10 时，侵彻效率随长径比增大而减小的主要原因并不是弹体自身问题。

表 3 侵彻深度的数值计算结果

Table 3 Numerical simulation results of penetration depth

No.	Penetrator numbers	Incident velocity/(km/s)	L/(mm)	D/(mm)	L/D	Penetration depth/(mm)
1	1	1.6	4	4	1	5.96
2	1	1.6	8	4	2	8.16
3	2	1.6	4	4	1	9.89
4	1	1.6	12	4	3	13.25
5	3	1.6	4	4	1	14.10

3.2 界面的影响

在弹体侵彻靶板过程中，特别是在弹体与靶板的接触瞬间，交界面对弹体的抵抗效果较明显。图 4 给出了入射速度为 1.6 km/s 的 3 种不同长杆弹(长径比分别为 1、2、3)侵彻钢靶板时弹体速度的计算结果。观察图 4 可知：(1) 弹体与靶板接触瞬间，速度急剧下降，下降速率较大且均匀，之后弹体速度变化逐渐变小，见图 4 中左端第 1 个斜率较大的短直线，说明弹体与靶板交界面的抵抗效应使弹体动能有较大程度的下降，即交界面对弹体的侵彻深度有较大影响，这与 Anderson 等人[12]的结论相同；(2) 随着长径比增大，弹体穿过靶板界面后的速度逐渐接近恒定值 1.5 km/s，而且，只要弹体材料和靶板材料不变，该值随长径比的变化并不非常明显[13]；(3) 当长径比达到一定值时，只要弹体和靶板材料不变，不管长径比怎样变化，速度损伤一定，即单位质量的动能损失不变。因此，虽然交界面对弹体侵彻效率和侵彻深度影响较大，但是交界面的抵抗效应并不是长径比对侵彻效率影响的主要原因。

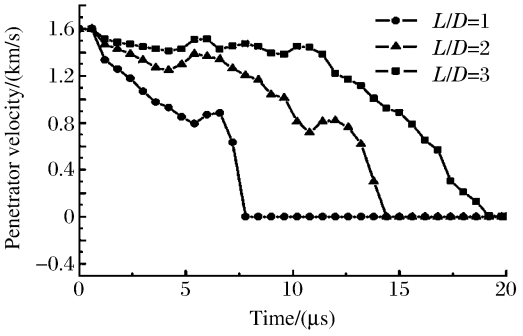


图 4 不同长径比弹体速度时程曲线

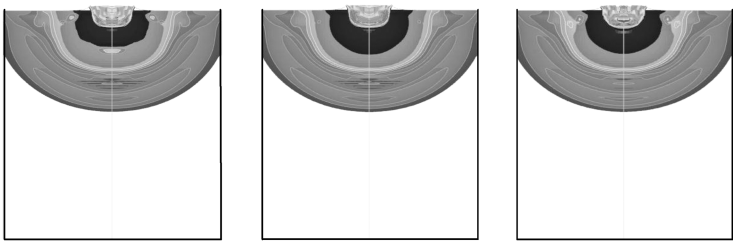
Fig. 4 Penetrator velocity curves for various aspect ratios

3.3 弹体在靶板中侵彻过程的影响

从图 4 中 $L/D=3$ 曲线可以明显看出，当长杆弹的长径比达到一定值时，弹体对靶板的侵彻过程可分为 3 个阶段：弹体穿过交界面阶段、弹体在靶板中稳定侵彻阶段、后续不稳定阶段，这与 Walker 等人[14]的结果类似。侵彻的主要过程为第 2 阶段，即稳定侵彻阶段。在这一过程中弹体的侵彻速度基本保持恒定，即质量损失阶段，由 Orphal 等人[13]的研究结果可知，此时的侵彻速度只与弹体和靶板材料有关。图 5 和图 6 分别为 $t=4.196$ μs 和最终时刻 3 种弹体的侵彻图。从中可以看出：第 1 阶段，靶板中形成了一个直径较大的近似半圆形坑洞；第 2 阶段，坑洞的直径较稳定，其中对于长径比达到一定值的弹体，弹体直径不变时弹体长度和入射速度的增加对弹体侵彻稳定期的弹坑直径影响不大；第 3 阶段，由于在第 2 阶段的侵彻过程中弹体的质量损失过大，弹体剩下的动能并不足以很好地完成侵彻，弹体速度急剧下降，弹坑半径也随之急剧减小，从而形成一个漏斗形坑洞。

根据能量守恒定律，弹体的动能最终转化为靶板的变形能和弹体及靶板的热能，如不考虑层裂效应，则能量值应相等。所以，可以从变形能和热能损失两个方面分析长径比对侵彻过程的影响。

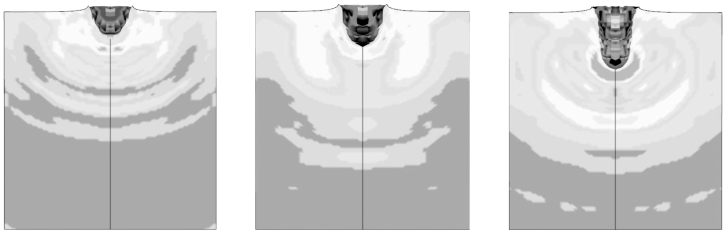
由图 4 可知,3 种长径比的长杆弹在弹侵彻过程中都较快地达到稳定期,$t=4.196\ \mu s$ 时即已全部进入稳定期。在此期间,弹体侵彻引起的弹体塑性应力分布并无较大区别,见图 5。在仿真过程中还发现,在侵彻稳定期内长径比的影响并不明显。另一方面,由 3.2 节的分析可知,第 1 阶段中侵彻效率的变化与长径比之间并无明显关系。因此,若长径比对侵彻效率的影响与其导致的靶板塑性变形有明显关系,则只可能是在侵彻过程中的第 3 阶段。事实上,每个弹体侵彻时只有一个漏斗形坑洞,对比表 2 可以看出侵彻过程的第 3 阶段产生的漏斗形坑洞对于节省能量有较大效果。这是因为长径比增大到原来的 3 倍时,漏斗形弹坑数只有 1 个,并没有增加,相对于 3 个长径比为 1 的弹体分别侵彻形成的 3 个漏斗形弹坑,大大地削减了侵彻深度,侵彻效率也明显降低。所以,在侵彻过程中的第 3 阶段侵彻效率与长径比有着密切的关系,即侵彻效率随长径比的增加而减小。



(a) L/D=1　　(b) L/D=2　　(c) L/D=3

图 5　$t=4.196\ \mu s$ 时 3 种不同长径比弹体的侵彻图

Fig. 5　Penetration diagrams of projectiles with various aspect ratio at $t=4.196\ \mu s$



(a) L/D=1　　(b) L/D=2　　(c) L/D=3

图 6　3 种不同长径比弹体的最终侵彻图

Fig. 6　Terminal penetration diagrams of projectiles with various aspect ratio

对于热能损失方面,在弹体直径一定的条件下,长径比较大时,弹体在靶板内的侵彻时间和侵彻长度较大,侵彻效应使靶板内的温度极高,这在很大程度上降低了弹体材料的等效屈服应力,从而加速弹体的质量损失,减小弹体的侵彻效率。因此,在弹体侵彻过程中,长径比较大的弹体损失热能较多,长径比对侵彻效率的影响较大。

4　结　论

影响长杆弹侵彻效率的因素很多。对于特定的弹体和靶板材料而言,主要影响因素为弹体的初始入射速度和长径比。结合实验数据,对 93W 长杆弹垂直侵彻半无限 4340 钢靶进行了数值模拟,系统分析了长径比对侵彻效率的影响。研究结果表明:

(1) 长径比大的弹体侵彻时,单位侵彻深度的能量密度损耗随长杆弹入射速度的增大而减小,随长径比的增大而逐渐增大,并且增大速率逐渐降低。

(2) 对于体积相等、长径比不等的同种材料弹体,侵彻效率随长径比的增加而减小,而侵彻深度却随长径比的增加而增大,直至达到最大值,并且最大值随弹体入射速度的增加而增大。

(3) 造成侵彻效率随长径比增加而减小的主要原因是弹体在靶板内侵彻过程的影响,并且主要是由于侵彻过程中后续不稳定阶段(结束阶段)产生的漏斗形弹坑及侵彻生热的影响,特别是漏斗形弹坑形成阶段,等侵彻深度弹体耗能相对最少、效率最高。虽然弹体与靶板的交界面对侵彻的最终深度有很大影响,但与长径比对侵彻效率的影响无明显关系。

References:

[1]　Rosenberg Z, Dekel E. A Computational Study of the Relations between Material Properties of Long-Rod Penetra-

tors and Their Ballistic Performance [J]. Int J Impact Eng,1998,21(4):283-296.
[2] Anderson C E Jr,Littlefield D L,Blaylock N W,et al. The Penetration Performance of Short L/D Projectiles [J]. AIP Conference Proceedings,1994,309:1809-1812.
[3] Hohler V,Stilp A J. Hypervelocity Impact of Rod Projectiles with L/D from 1 to 32 [J]. Int J Impact Eng,1987,5(1-4):323-331.
[4] Partom Y,Yaziv D. Penetration of $L/D=10$ and 20 Tungsten Alloy Projectiles into RHA Targets [J]. AIP Conference Proceedings,1994,309:1801-1804.
[5] Anderson C E Jr,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(1-3):13-24.
[6] Anderson C E Jr,Walker J D,Bless S J,et al. On the L/D Effect for Long-Rod Penetrators [J]. Int J Impact Eng,1996,18(3):247-264.
[7] Du Z H,Zeng G Q,Yu C X,et al. Experimental Research of Novel Penetrator Vertically Penetrating Semi-Infinite Target [J]. Journal of Ballistics,2008,20(1):19-21. (in Chinese)
杜忠华,曾国强,余春祥,等. 异型侵彻体垂直侵彻半无限靶板试验研究 [J]. 弹道学报,2008,20(1):19-21.
[8] LS-DYNA Theoretical Manual [Z]. California:Livermore Software Technology Corporation,1998.
[9] Johnson G R,Cook W H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains,High Strain Rates and High Temperatures [A]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics [C]. Hague,Netherlands,1983:541-547.
[10] Johnson G R,Cook W H. Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains,Strain Rates,Temperatures and Pressures [J]. Eng Fract Mech,1985,21(1):31-48.
[11] Anderson C E Jr,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.
[12] Anderson C E Jr,Walker J D. An Analytical Model for Dwell and Interface Defeat [J]. Int J Impact Eng,2005,31(9):1119-1132.
[13] Orphal D L,Anderson C E Jr. The Dependence of Penetration Velocity on Impact Velocity [J]. Int J Impact Eng,2006,33(1-2):546-554.
[14] Walker J D,Anderson C E. A Time-Dependent Model for Long-Rod Penetration [J]. Int J Impact Eng,1995,16(1):19-48.

Study on Effect Mechanism of Aspect Ratio for Vertical Penetration of a Long-Rod Projectile

GAO Guang-Fa[1,2,3],LI Yong-Chi[2],HUANG Rui-Yuan[2],DUAN Shi-Wei[2]

(1. *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. *Key Laboratory of Safe and Efficient Mining Cosponsored by Anhui Province and Ministry of Education,Huainan* 232001,*China*)

Abstract: The penetration depth is analyzed for a long-rod projectile penetrating semi-infinite target using dimensional theory. Combining numerical simulation and empirical formula studies, the effect mechanism of aspect ratio is systematically investigated. The results show that the normalized energy density consumption by penetration depth increases as increasing of aspect ratio when the penetration efficiency does not change. For the long-rod penetrators with same volume, the penetration depth increases with the increasing of aspect ratio until reaches a maximum value. The main reason of this phenomenon is due to the funnel-shaped crater and high-temperature generated in subsequent unstable stage of penetration. The interface resistance effect has strong influence on the penetration depth, but which has no apparent connection with the aspect ratio of penetrator.

Key words: penetration; aspect ratio; penetration efficiency; penetration depth