文章编号：1000-5773(2011)04-0339-05

杆式射流侵彻半无限靶的理论分析*

姜剑生，王 政，梁龙河，洪 滔

（北京应用物理与计算数学研究所，北京 100094）

摘要：理论分析高速杆式射流侵彻半无限靶过程时，考虑速度梯度对聚能射流的影响，将射流进行分段计算，得到了射流拉伸后实际碰靶时的微元长度和直径变化。采用伯努利方程和静力学方法，通过对射流形状和速度分布作线性近似，理论分析了高速杆式射流侵彻半无限靶的过程，得到了靶体中的侵彻深度和侵彻孔径与射流长度、速度及直径之间的关系。将模拟结果与实验结果进行对比，结果表明理论分析结果与侵彻实验结果符合较好。

关键词：杆式射流；侵彻；半无限靶；侵彻深度；侵彻孔径

中图分类号：O358；O385 **文献标识码**：A

1 引 言

杆式射流又称聚能杆式侵彻体，与 EFP(Explosively Formed Projectile)一样没有明显的射流和杵体之分，但其头尾存在一定的速度梯度，在飞行过程中随着时间和距离的增加，杆式射流的长度和形状会发生变化。与通常的聚能射流相比，杆式射流的头部速度相对较低，但尾部速度大大提高，并且不像普通射流那样对炸高非常敏感。杆式射流对目标的侵彻深度和侵彻孔径介于 EFP 和聚能射流之间，在对付多层间隔装甲防护目标及混凝土、岩石类目标方面，杆式射流具有良好的应用前景。

2 杆式射流侵彻过程分析

假设杆式射流在射流成形和侵彻靶体的过程中始终保持连续，不出现断裂现象，即不考虑数十倍炸高下杆式射流侵彻时必然出现的断裂情况。图 1 为杆式射流侵彻示意图。图 1(a)中，杆式射流的头部较细，设头部半径为 r_h，尾部半径为 r_t，整段射流近似为圆台体。设射流头部速度为 v_h，尾部速度为 v_t ($v_t<v_h$)，射流头部刚接触靶时的初始长度为 L，并且假设射流速度 v 及射流半径 r 从头部到尾部是线性变化的，即

$$\begin{cases} v = v_h - (v_h - v_t)x/L \\ r = r_h + (r_t - r_h)x/L \end{cases} \qquad 0 \leqslant x \leqslant L \tag{1}$$

高速射流在侵彻靶体时，其头部要发生钝粗和翻卷，侵彻形成的孔洞直径比射流直径大。假设射流头部被钝粗成半球形，见图 1(b)，将射流视为纯流体，由射流在侵彻孔洞底部的流动状态，即射流进入孔洞并能顺利折返的条件，可得射流头部半球体的最小半径 a，a 只与射流碰靶时的截面半径有关[1]，即

$$a^2 = 2r^2 \tag{2}$$

设射流物质的密度为 ρ_p，靶材料的密度为 ρ_t，侵彻速度为 u，靶材料的抗压屈服强度为 R_t。射流以相对速度 $v-u$ 撞击孔洞底部，根据伯努利公式，有

* **收稿日期**：2010-06-01；**修回日期**：2010-07-25

基金项目：中国工程物理研究院科学技术基金(2007A09002)

作者简介：姜剑生(1976－)，男，助理研究员，主要从事战斗部设计与数值模拟研究. E-mail:jsh_jiang@yahoo.com.cn

$$\frac{1}{2}\rho_{\mathrm{p}}(v-u)^2=\frac{1}{2}\rho_{\mathrm{t}}u^2+R_{\mathrm{t}} \tag{3}$$

(3)式等号左边即为弹靶交界面处的压力,即

$$p_0=\frac{1}{2}\rho_{\mathrm{p}}(v-u)^2 \tag{4}$$

射流头部半球体半径 a 只是射流能够顺利侵彻进入靶体的最小孔径,并不是靶板最终的侵彻孔径。假设射流头部半球面上的各处压力相等,根据静力学分析[2],球形空腔外靶体中的应力为

$$\begin{cases}\sigma_R=p_0a^3/R^3\\ \sigma_\theta=-p_0a^3/(2R^3)\end{cases}\qquad a\leqslant R\leqslant+\infty \tag{5}$$

式中:σ_R 为径向压应力,σ_θ 为周向拉应力,R 为距球腔中心的距离。

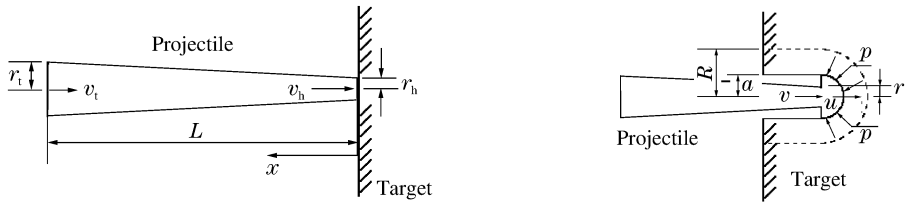


图 1 射流侵彻示意图

Fig. 1 Sketch of jet penetration

记射流头部碰靶时刻为零时刻,将圆台状射流沿轴向从头部至尾部平均分成 n 段,每段射流微元近似为一个小圆柱体。由于射流头部和尾部存在速度梯度,因此在射流侵彻过程中随着时间和飞行距离的增加,射流自身在不断发生拉伸变形。假定第 i 个射流微元段的前端速度为 v_i,后端速度为 v_{i+1}($v_{i+1}<v_i$),并且微元前端和后端速度在碰靶前始终保持不变,则随着时间的增加,微元段会逐渐延长并变细。设第 i 个微元的侵彻作用持续时间为 t_i,则该微元前端到达弹靶交界面并开始侵彻的时刻为

$$T_i=\sum_{j=1}^{i-1}t_j \tag{6}$$

从零时刻至 T_i 时刻,第 i 个射流微元段碰靶时的实际长度比初始长度伸长了 $\mathrm{d}l_i=(v_i-v_{i+1})T_i$,微元碰靶时的实际半径可根据微元体积不变的原则进行相应缩减。

将射流微元速度 v_i 代入(3)式,可得相应的侵彻速度 u_i,则 u_it_i 即为该微元在靶体中的侵彻深度。在(5)式中,令 σ_R 为靶材料的最大抗压强度,可以得到各微元相应的侵彻孔洞半径 R_{hole};对于混凝土等抗压强度与抗拉强度不同的材料,令(5)式中的 σ_θ 为抗拉强度,还可以获得混凝土侵彻孔洞外围的裂纹区半径 R_{crack}。

当所有射流微元全部作用完毕时,侵彻结束。杆状射流在半无限靶体中的侵彻深度 P 为

$$P=\sum_{i=1}^{n}u_it_i \tag{7}$$

3 结果与检验

李成兵等人[3]进行了杆式射流侵彻钢靶实验。实验中:采用密度为 1.67 g/cm^3 的注装 RDX60/TNT40炸药,装药直径为 70 mm,装药高度为 100 mm,无外壳;药型罩为变壁厚紫铜球缺结构,炸高为 210 mm;靶板为 4 块叠放在一起的尺寸为 150 mm×150 mm 的 45 钢板,上两层钢板厚度为 80 mm,下两层钢板厚度为 40 mm,将靶板从上到下依次编号为 1#～4#。起爆方式有 3 种:小环起爆(起爆半径为 15 mm)、大环起爆(起爆半径为 20 mm)、中心点起爆,每种起爆方式做两发实验。

采用北京应用物理与计算数学研究所开发的二维弹塑性流体力学计算程序 MEPH-2D,计算了李

成兵等人[3]实验中的装药结构从起爆到碰靶前杆式射流的成形和变化过程。模拟得到的 3 种不同起爆方式下杆式射流碰靶时的形态及其在钢靶中的侵彻孔洞,如图 2 所示。起爆后 79.5～86.7 μs,射流碰靶时的速度和形状见图 2(a)～图 2(f)。根据第 2 节中的侵彻分析理论,可以得到射流在钢靶中的侵彻孔洞,如图 2(g)～图 2(i)所示。

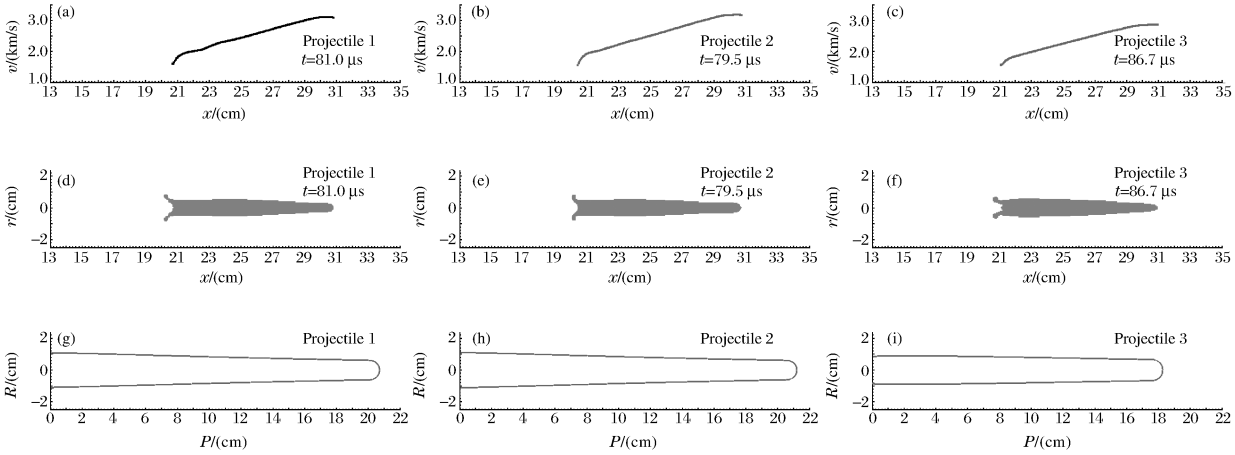


图 2　杆式射流碰靶时的形态及其在钢靶中的侵彻孔洞

Fig. 2　Rod-shaped projectiles and penetration holes in steel target

侵彻实验结果和理论计算结果列于表 1 和表 2。表 2 中:$D_{1,\mathrm{en}}$、$D_{2,\mathrm{en}}$、$D_{3,\mathrm{en}}$、$D_{4,\mathrm{en}}$分别为实验得到的靶板 1#～4#的侵彻入口孔径;$D_{1,\mathrm{ex}}$、$D_{2,\mathrm{ex}}$、$D_{3,\mathrm{ex}}$分别为实验测得的靶板 1#～3#的出口孔径;D_{en}为计算得到的侵彻孔洞入口直径;$D_{80\ \mathrm{mm}}$、$D_{160\ \mathrm{mm}}$和 $D_{200\ \mathrm{mm}}$为计算得到的孔洞中 80、160 及 200 mm 处的孔径,分别对应侵彻完钢靶 1#～3#时的侵彻孔径。从表 1 和表 2 中的数据可以看出,高速杆式射流侵彻钢靶的理论分析结果与实验结果基本相符,两者在侵彻深度和侵彻孔径上基本吻合。混凝土与岩石等地质材料的抗压/抗拉强度不同,力学行为比较复杂,很难准确模拟其侵彻破坏过程,但是应用本理论分析方法,可以得到较为可信的侵彻结果。

表 1　实验与理论侵彻深度

Table 1　Experimental and theoretical penetration depths

Test No.	Experimental results		Numerical results					P_{theor}/(mm)
	v_{h}/(m/s)	P/(mm)	v_{h}/(m/s)	v_{t}/(m/s)	r_{h}/(mm)	r_{t}/(mm)	L/(mm)	
1-1	3 174.6	187.4	3 083	1 583	3.0	5.0	103	207.1
1-2	2 985.1	175.5						
2-1	3 252.0	192.4	3 163	1 605	3.0	5.0	104	212.0
2-2	3 478.3	213.4						
3-1	2 816.9	164.3	2 845	1 577	2.5	5.0	98	182.7
3-2	2 877.7	174.3						

此外,我们还进行了不同结构的聚能装药(分别为 S1 和 S2)侵彻混凝土靶的实验。药型罩材料均为铝,混凝土靶的尺寸为∅140 cm×150 cm,混凝土密度为 2.4 g/cm^3,抗压强度 σ_R 为 52.1 MPa,抗拉强度 σ_θ 约为 5 MPa。聚能装药形成的杆式射流在碰靶时刻的速度和形状如图 3(a)～图 3(d)所示。S1 的头、尾速度分别为 4.75 km/s 和 2.17 km/s,去掉尾翼后的头、尾直径分别为 1.2 cm 和 3.2 cm,射流长度为 22.9 cm;S2 的头、尾速度分别为 3.84 km/s 和 2.20 km/s,去掉尾翼后的头、尾直径分别为 1.4 cm和 3.6 cm,射流长度为 19.6 cm。图 3(e)和图 3(f)给出了两种杆式射流在混凝土靶体中的侵彻分析结果,其中内侧区域表示侵彻孔洞,两线之间的区域表示由(5)式得到的裂纹区。

表 2 实验与理论侵彻孔径

Table 2 Experimental and theoretical penetration diameters (mm)

Test No.	$D_{1,\mathrm{en}}$	D_{en}	$D_{1,\mathrm{ex}}$	$D_{2,\mathrm{en}}$	$D_{80\ \mathrm{mm}}$	$D_{2,\mathrm{ex}}$	$D_{3,\mathrm{en}}$	$D_{160\ \mathrm{mm}}$	$D_{3,\mathrm{ex}}$	$D_{4,\mathrm{en}}$	$D_{200\ \mathrm{mm}}$
1-1	23.5	21.8	10.6	10.7	17.8	18.8	9.4	13.9			12.4
1-2	25.6		16.4	16.3		14.5	16.8				
2-1	27.6	22.2	14.7	13.6	18.0	13.1	12.3	14.1	12.7	10.6	12.5
2-2	21.4		12.6	12.6		11.4	12.4				
3-1	24.7	17.3	14.8	14.8	16.7	14.4	13.4	13.8			
3-2	22.5		11.3	11.3		10.7	8.6				

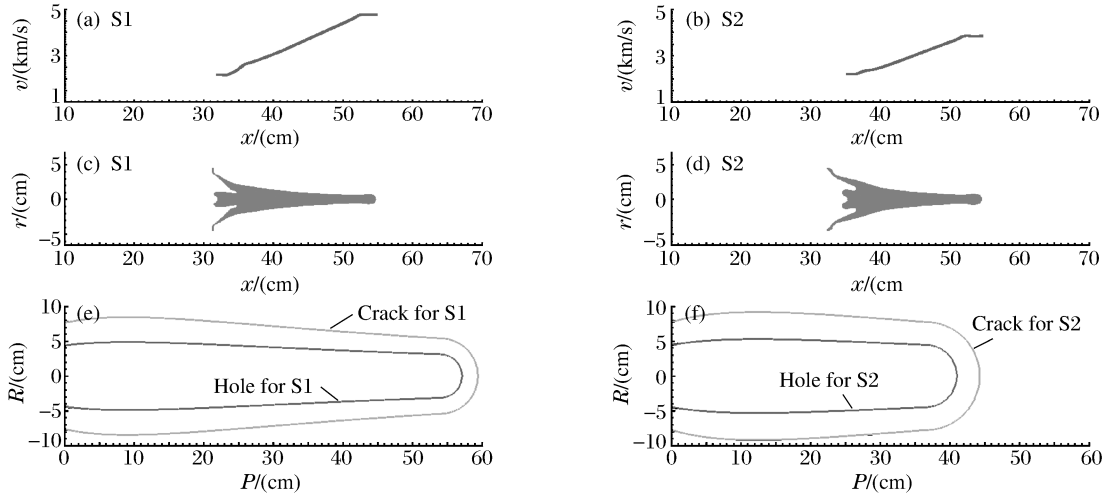


图 3 铝射流碰靶时的形态及其在混凝土靶中的侵彻孔洞

Fig. 3 Aluminium projectiles and penetration holes in concrete targets

侵彻实验照片见图 4。从图 4 可以看出:混凝土靶表面崩落,形成了一个漏斗坑,坑底部为侵彻孔洞。实验测得的侵彻孔径即为漏斗坑底部的侵彻孔径。侵彻孔洞周边的疏松区(理论裂纹区)因难以判别未测数据。表 3 列出了铝射流侵彻混凝土的实验结果和理论分析结果,其中:侵彻深度 P 等于漏斗坑深度 P_{crater} 加上漏斗坑底部的侵彻孔洞深度 P_{hole},$D_{\mathrm{hole,en}}$ 为漏斗坑底部侵彻孔洞的入口直径,$D_{\mathrm{crack,av}}$、$D_{\mathrm{hole,av}}$ 分别为计算得到的裂纹区和侵彻孔洞的平均直径,$D_{\mathrm{crack,b}}$ 为计算得到的漏斗坑底部裂纹区直径。从表 3 可以看出,虽然本研究的理论分析方法无法给出混凝土表面的开坑形状,但是,漏斗坑底部的侵彻孔洞大小及总侵彻深度的理论值与实验结果符合较好。



(a) S1 (b) S2

图 4 铝射流侵彻混凝土实验

Fig. 4 Concrete penetrated by aluminium projectiles

表 3　铝射流侵彻混凝土实验及理论分析结果

Table 3　Experimental and theoretical results of concrete target penetrated by an aluminium projectile　(cm)

Test No.	Experimental results					Numerical results				
	P	P_{crater}	P_{hole}	Crater size	$D_{hole,en}$	P	$D_{crack,av}$	$D_{hole,av}$	$D_{crack,b}$	$D_{hole,en}$
S1	57	36	21	90×110	≈10	57.1	15.2	8.8	13.4	7.7
S2	40	25	15	80×85	≈10	41.0	17.4	10.0	17.2	9.9

4　结　论

根据伯努利方程和球形空腔静力学应力分析,提出了一种简单的侵彻理论分析方法,可以较好地预测高速杆式射流在半无限靶中的侵彻深度和侵彻孔径。无论是对于钢靶,还是对于损伤破坏力学过程较复杂的混凝土靶,都可以应用该分析方法。需要指出的是,这种简单的侵彻理论分析方法具有局限性,它仅适用于尾部速度较高的杆式射流侵彻半无限靶的情况,对于射流头尾速度梯度较大的普通射流、在侵彻过程中可能发生断裂的射流以及尾部速度较低的射流,该方法尚不能适用。

References:

[1] Ma X Q. Impact Dynamics [M]. Beijng: Beijing Institute of Technology Press, 1992: 371. (in Chinese)
马晓青. 冲击动力学 [M]. 北京:北京理工大学出版社, 1992: 371.

[2] Wang L L. Foundation of Stress Waves [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005: 233. (in Chinese)
王礼立. 应力波基础 [M]. 北京:国防工业出版社, 2005: 233.

[3] Li C B, Pei M J, Shen Z W, et al. Influence of Initiation Way on the Formation and Armor-Piercing Performance of the Rod Projectile [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(3): 47-51. (in Chinese)
李成兵, 裴明敬, 沈兆武, 等. 起爆方式对杆式弹丸成型和穿甲的影响 [J]. 火炸药学报, 2006, 29(3): 47-51.

[4] Ma X Q, Han F. High-Speed Impact Dynamics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. (in Chinese)
马晓青, 韩　峰. 高速碰撞动力学 [M]. 北京:国防工业出版社, 1998.

[5] Sui S S, Wang S S. Terminal Effects [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. (in Chinese)
隋树元, 王树山. 终点效应学 [M]. 北京:国防工业出版社, 2000.

Penetration Analysis of a Rod-Shaped Projectile in Semi-Infinite Target

JIANG Jian-Sheng, WANG Zheng, LIANG Long-He, HONG Tao

(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing* 100094, *China*)

Abstract: When analyzing the penetration of a rod-shaped projectile in semi-infinite target, the velocity gradient of the shaped charge jet is taken into account. The jet is divided into a series of segments, and the variations of the length and diameter of each jet segment are calculated at the moment of impacting on the target. Through the Bernoulli equation, linear approximations of velocity and diameter of the jet, and static method, the relationship between penetration depth and hole diameter in the target and impacting jet is obtained. Moreover, the simulated results are in quite good agreement with the experimental data.

Key words: rod-shaped projectile; penetration; semi-infinite target; penetration depth; penetration diameter