

# 杆弹头部形状对侵彻行为的影响及其机制\*

高光发<sup>1,2</sup>, 李永池<sup>2</sup>, 黄瑞源<sup>2</sup>, 李平<sup>2</sup>

(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中科院材料力学行为和设计重点实验室, 合肥 230027)

**摘要:**为探讨不同靶板类型时杆弹头部形状对侵彻行为的影响,对几种头部形状杆弹进行了数值仿真。研究表明:靶板为4340钢且入射速度较小时,杆弹头部形状对侵彻行为有一定的影响,最优头部形状是半球形,速度较大时,头部形状只在开坑阶段对侵彻行为造成影响,对弹体的最终侵彻效率影响并不大;靶板为混凝土时,头部形状对侵彻行为有很大的影响,卵形头部弹体的侵彻能力明显强于其它两种头部形状的弹体;并对其影响机制进行了深入的研究。

**关键词:**爆炸力学;侵彻;头部形状

**中图分类号:**TJ760.1;O385 **文献标志码:**A

## Effect of Nose Shape on Penetration Performance of Long-rod Penetrator and Its Mechanism

GAO Guangfa<sup>1,2</sup>, LI Yongchi<sup>2</sup>, HUANG Ruiyuan<sup>2</sup>, LI Ping<sup>2</sup>

(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, Anhui Huainan 232001, China;

2 Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Hefei 230027, China)

**Abstract:** Aimed at the influence laws and mechanism of the nose shapes of the rod penetrators on penetrating performance, the research on rod penetrators with different nose shape vertical penetrating was carried on. The results show that for the 4340 steel target, the nose shape of the penetrator has some influence on penetration depth if the incident velocity is rather small, but the optimal shape is semi-spherical rather than ogival or flat, however, if the incident velocity is big enough, the effect of nose shape on penetration efficiency is very little and which only has some influence on it in the cratering stage; For the concrete target, the nose shape has great influence on the penetration behavior and the penetration performance of the ogive-nose penetrator is distinctly better than the other two. The effect mechanism of which was also investigated.

**Keywords:** mechanics of explosion; penetration; nose shape

## 0 引言

一直以来,杆弹对半无限厚靶板的侵彻过程都是使用流体动力学或改进的流体动力学进行理论近似分析<sup>[1-3]</sup>,这些模型都没有考虑侵彻过程中的开坑阶段和弹体头部形状的影响,研究表明,在杆弹对靶板的垂直侵彻过程中,弹体的头部形状对侵彻过程有一定的影响<sup>[4]</sup>。然而,具体到头部形状对侵彻行为的影响程度及机制,许多学者说法并不一致,甚至大相径庭,Rosenberg等<sup>[5]</sup>认为弹头形状对弹体侵彻效率的

影响非常大,并经过计算表明几种头部形状不同的弹体侵彻效率相差数倍,而程兴旺等<sup>[6]</sup>通过计算认为头部形状虽然对侵彻效率有一定的影响,但主要是影响其开坑阶段,且不同头部形状弹体的侵彻深度相差不超过10%。事实上,弹体头部形状对侵彻行为的影响是与弹体及靶板的强度相关的,Rosenberg和程兴旺所得的结论不一样主要是因为其二者研究的靶板不同,所以并不能判断哪种结论正确。

文中综合考虑弹体和靶板强度接近和相差较大两种情况,分析不同头部形状弹体在不同入射速度下

\* 收稿日期:2012-03-03

基金项目:国家自然科学基金(10632080);武器装备探索研究项目;国防973项目;中国博士后科学基金(2011M501394);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);安徽理工大学博士基金(2011yb007)资助

作者简介:高光发(1980-),男,湖北黄冈人,副教授,博士后研究,研究方向:爆炸力学,冲击动力学,地下动力灾害防治。

的侵彻行为,研究头部形状对弹体侵彻行为的影响规律及机制。

### 1 模型的建立和材料参数的选取

文中采用非线性有限元软件 Ls-dyna 进行数值仿真,研究中取 1/4 模型进行分析,对称面定义为反对称约束,金属靶板边界和底面定义为无反射边界,混凝土靶板侧边界采用固定边界条件,单元采用八节点六面体单元,具体模型如图 1 所示。

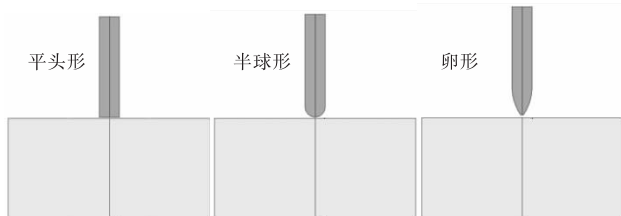


图 1 侵彻模型图

图 1 中 3 个弹体的材料为 93W 合金,其体积相同,具体尺寸见图 2(单位 cm)所示;靶板材料分 4340 钢和普通混凝土两种,尺寸均为 10cm × 10cm ×

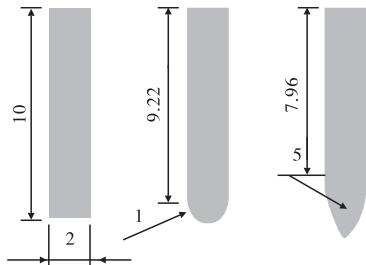


图 2 弹体的尺寸

10cm。93W 合金和 4340 钢材料的本构模型为 Johnson-cook 模型,状态方程采用 Gruneisen 方程,混凝土采用 HJC 模型,具体可参考文献[7];材料的本构参数<sup>[8-10]</sup>如表 1 和表 2 所示,其中参数的意义可见文献[10],根据文献[11]中的验证可知,模型以及和 93W、4340 钢材料参数的选取是合理的,另外,文中 HJC 模型采用原刊<sup>[10]</sup>中的数据,该数据应是可信的。因此,本次数值计算中采用的模型和参数是可信的、合理的。

表 1 靶板合金、钢材料参数

参数	材料		参数	材料	
	93W	4340 钢		93W	4340 钢
A/MPa	1506	1189	D4	0.007	0.002
B/MPa	177	765	D5	0.37	0.61
n	0.12	0.26	$\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$	17.6	7.83
C	0.016	0.014	$C/(m \cdot s^{-1})$	3850	4578
m	1.00	1.03	S1	1.44	1.33
D1	0.16	0.05	$\gamma_0$	1.58	1.67
D2	3.13	3.44	a		0.47
D3	-2.04	-2.12			

表 2 靶板混凝土 HJC 本构参数

参数	参数值	参数	参数值
$\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$	2.44	$P_{crush}/GPa$	0.016
G/GPa	14.86	$\mu_{crush}$	0.001
A	0.79	$P_{lock}/GPa$	0.80
B	1.60	$\mu_{lock}$	0.10
C	0.007	D1	0.04
N	0.61	D2	1
$f'_c/GPa$	0.048	K1/GPa	85
T/GPa	0.004	K2/GPa	-171
$S_{max}$	7.0	K3/GPa	208
EFMIN	0.01	$\dot{\epsilon}^*/\mu s^{-1}$	0.000001

### 2 靶板材料为 4340 钢

对入射速度分别为 800m/s、1000m/s、1200m/s、1400m/s 和 1600m/s 的三种等动能弹体垂直侵彻 4340 钢板进行数值计算,并定义侵彻效率为侵彻深度 P 与弹体长度 L 之比,可得此 15 种情况下弹体的侵彻深度和侵彻效率,如表 3 所示。

表 3 弹体的侵彻深度和侵彻效率

射速/ (m/s)	侵彻深度/cm			侵彻效率(P/L)		
	平头形	半球形	卵形	平头形	半球形	卵形
800	3.76	4.70	3.42	0.376	0.460	0.312
1000	5.22	5.62	4.91	0.522	0.550	0.448
1200	6.67	7.85	6.90	0.667	0.768	0.630
1400	8.48	8.95	9.14	0.848	0.876	0.834
1600	9.44	10.02	10.23	0.944	0.980	0.934

从表 3 可以看出,以上三种杆弹垂直侵彻 4340 钢靶板时:

1) 头部形状为半球形的杆弹侵彻深度始终比平头弹大;头部形状为卵形的杆弹在低速时侵彻深度比其它两种弹体的侵彻深度要小,但是当入射速度大于 1200m/s 时其侵彻深度大于平头弹的侵彻深度,当入射速度大于 1400m/s 时其侵彻深度大于半球头弹。这说明,对于等动能杆弹垂直侵彻 4340 钢靶板而言,当弹体的直径相同时,弹头形状对侵彻深度有一定的影响,适当让头部形状变圆变尖有利于提高其侵彻深度,但在低速时,由于靶板强度很大,如弹头过尖,则会使得尖头部分在侵彻前期迅速产生直径更大的蘑菇头部(如图 3 所示),反而加大侵彻阻力而不利于弹体的侵彻。



图 3 侵彻后弹体的形状 (V = 400m/s)

2) 此三种头部形状杆弹的侵彻效率的差别逐渐缩小,当入射速度为 1600m/s 时,此三种弹体的侵彻效率已较接近了,如图 4 所示。这说明当入射速度大于一定

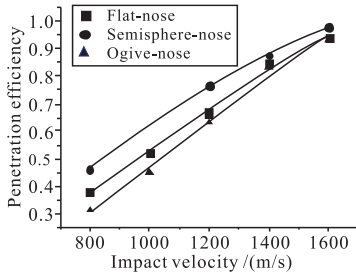


图 4 不同弹头形状时侵彻效率与入射速度的关系

值时,头部形状对侵彻效率的影响较小,这与文献[6]所得的结果一致。也就是说,当弹体长度一定,且入射速度很大时,头部形状对弹体侵彻深度的影响很小。这时因为,弹体的头部形状主要影响开坑阶段的侵彻行为,当弹体的速度很大时,弹体的主要侵彻深度源于准稳定阶段,而在此阶段,不管头部是何种初始形状基本都成为蘑菇头状(如图 5 所示),因此此时原始的弹体头部形状基本对侵彻行为不构成影响。

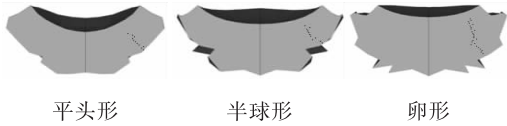


图 5 侵彻后弹体的形状 (V = 1400m/s)

### 3 靶板材料为混凝土

对入射速度分别为 400m/s、600m/s、800m/s 和 1000m/s 的三种等动能弹体垂直侵彻普通混凝土靶板进行数值计算,为了取得较精确的数据,计算中网格划分较小,从而限制了靶板的网格数,在此,通过比较三种弹体侵彻 10cm 厚靶板后的剩余速度和剩余弹头形状来比较和分析不同头部形状的侵彻行为。

表 4 弹体的剩余速度和动能损失

射速/ (m/s)	剩余速度/(m/s)			动能损失/%		
	平头形	半球形	卵形	平头形	半球形	卵形
400	315.1	348.3	375.5	37.9	24.2	11.9
600	452.0	534.5	580.5	44.1	20.7	6.4
800	594.6	713.6	781.2	46.1	20.5	4.6
1000	762.4	818.3	982.4	45.8	34.5	3.5

从表 4 可以看出,以上三种杆弹垂直侵彻混凝土靶板时:

1) 弹体的头部形状对弹体的侵彻能力有非常大的影响,卵形头部弹体的剩余速度明显大于半球形头部弹体的剩余速度,且都大于平头弹的剩余速度,这与文献[5]的研究结论一致。这说明此种情况下,卵形头部弹体、半球形头部弹体和平头弹的侵彻能力呈递减的规律。这主要是因为:首先,尖头弹与钝头弹

在侵彻混凝土靶板时的侵彻机制并不相同,尖头弹在侵彻过程中其头部很小的区域内会被压碎,然后尖头“挤入”,而钝头弹在侵彻过程中先将弹体前方区域的材料压碎然后“凿入”<sup>[12]</sup>,对于混凝土这类抗拉强度和抗剪强度远低于其抗压强度的材料而言,前者的侵彻效率远比后者大;其次,由于混凝土靶板的强度相对较低,使得尖头弹在一定的侵彻速度下一直能够保持尖头形状;因此,卵形头部弹体对混凝土类材料的侵彻能力远强于其它两类弹体。

2) 对于侵彻同样厚度的混凝土靶板而言,等动能的卵形头部弹体的耗能最小,半球形头部弹体的耗能次之,平头弹的耗能最大。一般来说,随着入射速度的增加,弹体开坑阶段所耗能量会有所减小,因此此次数值计算的能量损失应随入射速度的增加而减小,而从表中可知卵形头部的弹体满足此规律,而半球形弹体当入射速度大于 1000m/s 并不满足该规律,平头弹更是如此,它与此规律正好相反。这主要是因为,平头弹在入射速度较低(600m/s)时其头部已出现扩大现象,如图 6 所示;半球形头部的弹体在大于 1000m/s 时才开始出现此类现象,如图 7 所示;而卵形头部的弹头在此次计算的人射速度范围内都没有出现此类现象,如图 8 所示。

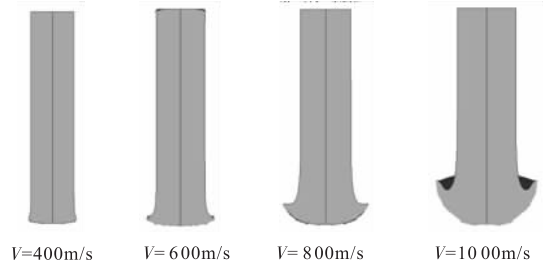


图 6 平头弹侵彻后弹体的形状

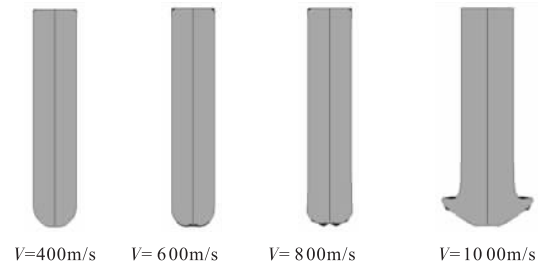


图 7 半球形头部弹体侵彻后弹体的形状

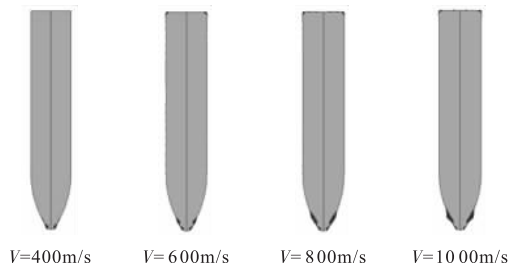


图 8 卵形头部弹体侵彻后弹体的形状

## 4 结论

从数值计算结果和上述分析可知,杆弹的头部形状对弹体的侵彻行为有一定的影响,当弹体的材料为特定的金属材料时,头部形状对侵彻行为的影响程度和影响机制与靶板的材料特性密切相关。由于杆弹垂直侵彻靶板(包括金属靶板和混凝土靶板)满足几何相似律,因此以上研究结论中定性部分结论对于更大尺寸的弹体也适用,但由于材料的尺度效应,特别是混凝土类材料的尺度效应更明显,因此以上定量研究结论只适用于其尺度与文中弹体尺度在一个量级时的情况。

对于强度较大的靶板而言,弹体的头部只影响开坑阶段的侵彻行为。当弹体入射速度达到一定值,弹体头部在到达侵彻准稳定阶段前一般都成为“蘑菇头”,而由于弹体的主要侵彻深度是在准稳定过程形成,而此种情况下弹体的头部形状对杆弹的侵彻行为影响不大。

对于强度较小的脆性材料而言,弹体的头部形状对侵彻行为影响非常大。此种情况下,尖头弹与钝头弹的侵彻机制也不相同,尖头弹是“挤入式”侵彻,而钝头弹是“凿入式”侵彻,前者的侵彻能力明显较后者强。由于尖头弹在侵彻过程中弹体的头部形状能够基本保持不变,因而可作为刚体弹分析。

综上所述,弹体的头部形状对侵彻行为的影响应该根据实际情况分析,对于不同的研究对象得出的结论不完全一致。文中的研究结论对杆弹(如穿甲弹、钻地弹等)的设计提供一定的参考。

### 参考文献:

[1] Tate A. A theory for the deceleration of long rods after impact[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1967,15(6):387-399.

(上接第 44 页)

究有着非常重要的理论和实际意义。文中尝试提出鱼雷航向控制综合方法,融合 RS 理论、Chaos 理论和 LSSVM 模型的特点,提出基于 RS-Chaos-LSSVM 综合航向控制器。利用 Chaos 理论保证最优的 LSSVM 模型,达到最优的控制精度。RS 理论属性简约,剔除冗余信息,提高预测快速性。仿真结果表明,鱼雷航向的 RS-Chaos-LSSVM 控制方法在保证高的控制精度下,具有更好的实时性、自适应性和鲁棒性。

### 参考文献:

[1] J Juh. A neural net controller for underwater robotic vehicles[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1990, 15(3): 161-166.  
[2] A JHealey, David Lienard. Multivariable sliding mode con-

[2] Tate A. Further results in the theory of long rod penetration [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1969, 17(3):141-150.  
[3] Rosenberg Z, Marmor E, Mayselless M. On the hydrodynamic theory of long-rod penetration[J]. International Journal of Impact Engineering, 1990,10(1/4):483-486.  
[4] Luk V K, Forrestal M J. Penetration into semi-infinite reinforced-concrete targets with spherical and ogival nose projectiles [J]. International Journal of Impact Engineering, 1987, 16(4):291-301.  
[5] Rosenberg Z, Dekel E. On the role of nose profile in long-rod penetration [J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 22(5): 551-557.  
[6] 程兴旺,王富耻,李树奎,等. 不同头部形状长杆弹侵彻过程的数值模拟[J]. 兵工学报,2007,28(8):930-933.  
[7] LSTC. LS-DYNA theoretical manual [M]. USA: Livermore Software Technology Corporation,1998.  
[8] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1):31-48.  
[9] Anderson C E, Walker J D, Bless S J, et al. On the L/D effect for long-rod penetration [J]. International Journal of Impact Engineering, 1996, 18(3): 247-264.  
[10] Holmquist T J, Johnson G R, Cook H W. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures [C]//Proceedings of 14th International Symposium on Ballistics, 1993:591-600.  
[11] 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.  
[12] 温万治,挥寿榕,江松. 弹头部形状对侵彻影响的数值模拟研究 [J]. 爆炸与冲击,2003,23(2):140-146.

control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1993, 18(3): 327-339.

[3] S M Smith, G J S Rae, D T Anderson, A M Shein. Fuzzy logic control of an autonomous underwater vehicle [J]. Control Engineering Practice, 1994, 2(2): 321-331.  
[4] 李佩娟,徐晓苏,张涛. 信息融合技术在水下组合导航系统中的应用 [J]. 中国惯性技术学报,2009,17(3):344-349.  
[5] 张文修. 粗糙集理论及其应用 [M]. 北京:科学技术出版社,2003:10-13.  
[6] Nurettin Ac1r. Classification of ECG beats by using a fast least square support vector machines with a dynamic programming feature selection algorithm [J]. Neural Comput & Applic, 2005,14(4): 299-309.