

# 弹丸头部形状和长径比对侵彻过程的影响研究\*

徐 英, 时家明, 林志丹

(解放军电子工程学院安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 合肥 230037)

**摘 要:** 为了研究弹丸材料强度远大于靶板材料时, 弹丸的头部形状和长径比对侵彻效果的影响。利用 LS-DYNA 对三种不同头部形状和不同长径比的弹丸侵彻薄板和半无限厚靶板进行数值模拟, 分析弹丸头部形状和长径比对侵彻效果的影响。结果表明: 圆锥形头部的弹丸在侵彻薄板时能够获得更大的弹坑, 并具有更强的侵彻能力, 半球形头部的弹丸则在侵彻半无限厚靶板时具有更大的侵彻深度, 而长径比较大的弹丸虽然具有较强的穿透能力, 但随着长径比的增大, 它对侵彻效果的影响逐渐减弱。

**关键词:** 弹丸; 头部形状; 长径比; 侵彻; 数值模拟

**中图分类号:** TJ410.33; O347 **文献标志码:** A

## On the Nose Profile Role and Slenderness Ratio of Projectile in Penetration

XU Ying, SHI Jiaming, LIN Zhidan

(Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province,  
Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** In order to study the influence of nose profile and slenderness ratio of projectile on penetration when the material strength of projectile is higher than that of target, the process of penetrating thin plates and semi-infinite targets with three kinds of nose profiles and different slenderness ratio of projectiles were studied by numerical simulation with LS-DYNA. The effect of nose profile and slenderness ratio on penetration was analyzed. The analytical results show that projectiles with conical nose cause bigger cross-section craters and stronger penetrability when penetrating the thin plates, while projectiles with hemispherical nose cause deeper penetration depth when penetrating the semi-infinite targets. Although the projectiles with high slenderness ratio have high penetrability, the effect of slenderness ratio is wearing off with the aggrandizement of it.

**Keywords:** projectile; nose profile; slenderness ratio; penetration; numerical simulation

## 0 引言

高速弹丸对靶板的侵彻问题是一项具有实际和理论意义的课题, Rosenberg Z 等<sup>[1-2]</sup>对不同头部形状的长杆弹侵彻半无限厚靶板的过程进行了模拟, 得出在半无限厚靶板为高强度材料时弹丸头部形状对侵彻深度影响很小, 但对形成的弹坑的坑口直径和坑口形貌有一定影响。文中采用 LS-DYNA 非线性动力学软件<sup>[3]</sup> 仿真分析弹丸高速侵彻薄板和半无限厚靶板时, 弹丸头部形状和弹丸长径比对弹靶侵彻过程、侵彻深度和侵彻形成的坑洞截面的影响。

## 1 数值模拟方法

假定弹丸垂直侵彻目标靶板, 考虑结构对称性, 将弹丸和靶板都取 1/4 建模, 对称面定义为反对称约束单元, 采用八节点六面体单元, 靶板边界设为无反射边界。建模时选取半球形(HN, hemispherical nose)、圆锥形(CN, conical nose)和圆柱形(BN, blunt nose)三种典型头部形状和不同长径比进行弹靶侵彻过程的数值模拟。

文中主要研究弹头形状和弹丸长径比对靶板材料的破坏, 为此作如下假定:

1) 弹丸材料的强度远大于靶板材料, 不考虑

\* 收稿日期: 2008-11-27

作者简介: 徐英(1979-), 女, 山东沂南人, 讲师, 博士研究生, 研究方向: 弹丸侵彻碰撞仿真。

弹丸材料的失效特性;

- 2) 材料的损伤是各向同性的;
- 3) 在一个微元上, 材料的损伤是均匀的。

弹丸材料采用铜, 选取刚性材料模型。靶板材料取为 4340 钢, 采用 Johnson-cook 强度模型及 Grunsien 状态方程。材料参数<sup>[3]</sup>见表 1 和表 2, 采用  $g\text{-cm-}\mu\text{s}$  单位制, 各材料参数的含义参见文献

表 1 弹丸的刚性材料模型参数

参数	参数值
DENS	8.93
EX	1.17
NUXY	0.35

[4]。采用面-面侵彻接触算法, 不考虑弹靶摩擦作用。

表 2 靶板的 Johnson-cook 材料模型和 Grunsien 方程参数

参数	参数值	参数	参数值	参数	参数值	参数	参数值
DENS	7.83	M	1.03	D1	0.8	S1	1.49
EX	2	TM	17930	D2	0	S2	0
NUXY	0.32	TR	294	D3	0	S3	0
A	$7.92 \times 10^{-3}$	C	$1.4 \times 10^{-2}$	D4	0	GAMAO	2.17
B	$5.1 \times 10^{-3}$	EPSO	$1 \times 10^{-6}$	D5	0	A	0.46
N	0.26	PC	$4.77 \times 10^{-6}$	C	0.4569	E0	0
						V0	1

弹头形状分别取为半球形、圆锥形和圆柱形, 如图 1。在保持弹丸质量不变的前提下, 对不同长径比的弹丸侵彻薄板和半无限厚靶板的过程进行仿真, 分析弹丸头部形状及长径比对侵彻效果的影响。

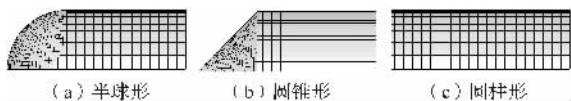


图 1 三种不同头部形状的弹丸模型

## 2 弹丸侵彻薄板

仿真时取薄板的厚度为 0.3cm, 撞击速度取为  $0.13\text{cm}/\mu\text{s}$  (即  $1.3\text{km/s}$ ), 分别取弹丸头部形状为半球形、圆锥形和圆柱形, 长径比为 1、5、10 和 20。弹靶作用过程中, 不同头部形状和长径比的弹丸均能穿透薄板, 并在靶板上形成一定大小的弹洞, 弹洞截面尺寸见图 2, 弹丸在穿靶过程中的速度变化曲线如图 3。

数值仿真结果显示, 在弹丸长径比一定的情况下, 圆锥形头部的弹丸穿透靶板耗时最长, 速

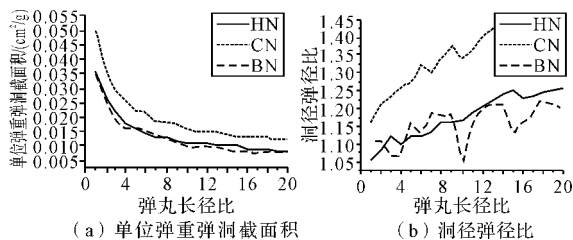


图 2 不同形状和长径比的弹丸侵彻薄板时的弹洞大小

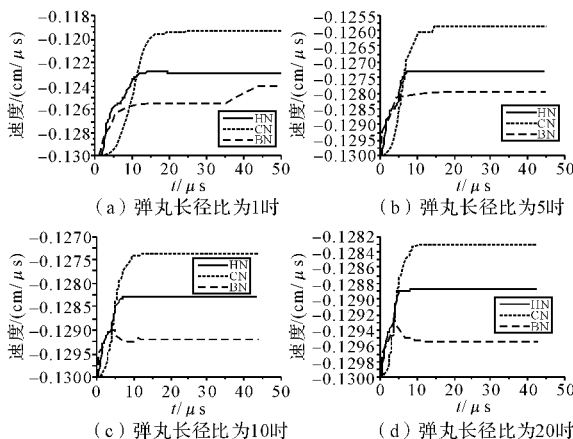


图 3 穿靶过程中不同头部形状弹丸的速度变化曲线

度改变最多, 弹洞截面最大; 圆柱形头部的弹丸穿靶耗时最短, 速度变化最少, 弹洞截面也最小 (见图 3)。另一方面, 在弹头形状确定的情况下, 弹丸的长径比越大, 与靶板的接触截面越小, 弹丸在穿靶过程中所受的阻力越小, 将靶板穿透所需时间越短 (即越容易将靶板穿透), 速度改变越小, 弹洞截面也越小, 且长径比对弹洞截面的影响随着长径比的增大而逐渐减弱 (见图 2(a))。此外, 洞径弹径比随弹丸长径比的增大而略有增加, 其中圆锥形头部弹丸的洞径弹径比最大 (见图 2(b))。所以, 对于侵彻薄板而言, 圆锥形头部的弹丸在靶板上形成的弹洞截面更大, 具有更强的侵彻能力。在弹丸均能够穿透薄板的前提下, 长径比较大的弹丸穿透性能较强, 但这种影响随着长径比的增大而逐渐减弱。

## 3 弹丸侵彻半无限厚靶板

同样方法, 对弹丸侵彻半无限厚靶板进行数值仿真。不同头部形状和长径比的弹丸侵彻半无限厚靶板的侵彻深度和在靶板上形成的弹坑截面大小见图 4 和图 5。

长径比相同时, 圆锥形头部弹丸在靶板上形成的弹坑截面和坑径弹径比最大, 这与侵彻薄板时的结果一致; 半球形头部弹丸的侵彻深度最

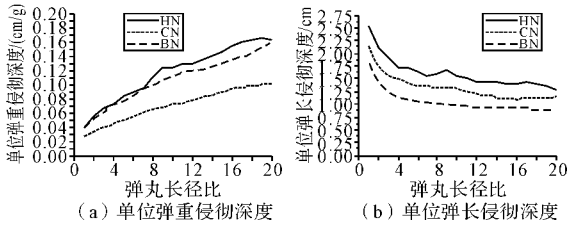


图 4 不同头部形状弹丸的侵彻深度

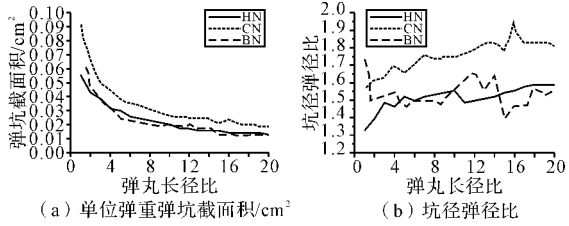


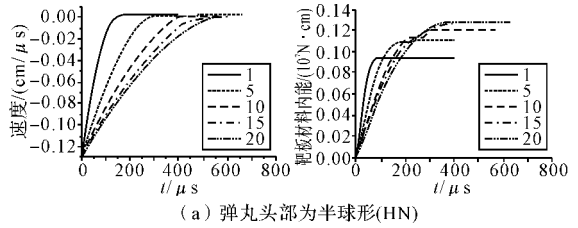
图 5 不同头部形状弹丸侵彻靶板形成的弹坑大小

深,而圆柱形头部弹丸的侵彻深度最浅,二者在靶板上形成的弹坑截面大小差不多。另一方面,弹丸的长径比越大,受力截面越小,导致弹丸所受阻力减小,速度改变越慢,侵彻过程变长,单位弹重侵彻深度更深。但单位弹长侵彻深度和弹坑截面随弹丸长径比的增大而减小,且随着长径比的增大,这种影响逐渐减弱。所以,在侵彻半无限厚靶板时,为了获得更大的侵彻深度,应该选择半球形头部和长径比较大的弹丸。

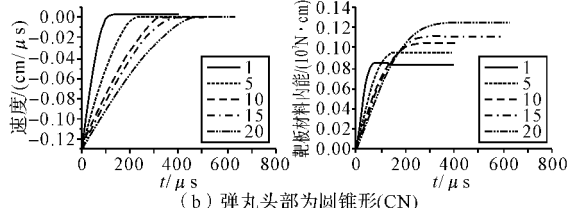
以长径比为 1、5、10、15 和 20 的弹丸为例来看侵彻过程,不同头部形状的弹丸侵彻半无限厚靶板过程的速度曲线和靶板材料的内能曲线如图 6。

数值模拟结果显示,弹丸在半无限厚靶板内前进一段距离后都停止运动。圆锥形头部的弹丸最早停止运动,而半球形头部弹丸的侵彻过程持续时间最长。由于弹丸对靶板材料的挤凿作用使得靶板材料的内能增加,随着弹丸长径比的增加,侵彻深度增大,靶板材料的内能也随之增大。侵彻结束后,半球形头部弹丸侵彻的靶板材料内能最大,其次是圆锥形头部的弹丸,圆柱形头部弹丸侵彻的靶板材料内能最小。

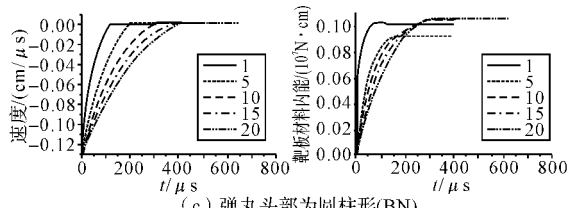
此外,弹丸头部形状也影响在靶板上形成的弹坑形貌。以长径比为 2 的弹丸为例,不同头部形状的弹丸侵彻半无限厚靶板,当弹丸在靶板中停止时的弹靶状态和弹坑剖面图如图 7。弹丸撞击靶板瞬间产生的强平面波由于撞击界面的反射而发生变形,并在传播过程中以半球面膨胀波的形式衰减。这个初始的膨胀波不仅削弱了激波而且导致了弹坑表面材料的飞溅,加之弹头



(a) 弹丸头部为半球形(HN)

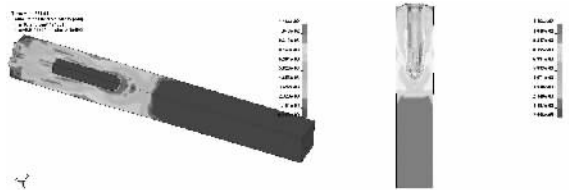


(b) 弹丸头部为圆锥形(CN)

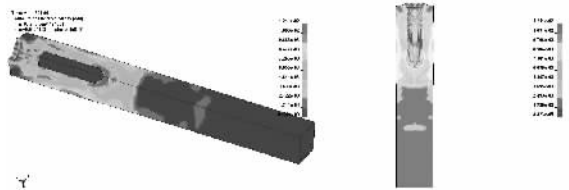


(c) 弹丸头部为圆柱形(BN)

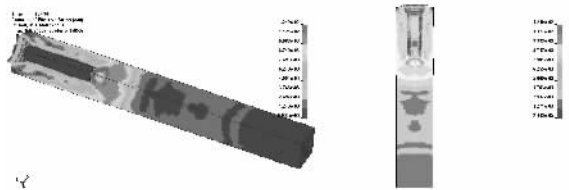
图 6 弹丸速度变化曲线和靶板材料内能曲线



(a) 弹丸头部为半球形(HN)



(b) 弹丸头部为圆锥形(CN)



(c) 弹丸头部为圆柱形(BN)

图 7 弹丸在靶板中停止运动时的弹靶状态和弹坑剖面图

的挤压,从而形成不同形貌的坑口。所以弹坑截面受到弹丸头部形状和尺寸的影响。由于半球形和圆锥形的弹丸头部较为平滑,反射波分布均匀,所以形成的弹坑坑口边缘较为均匀,而圆柱形头部的弹丸形成的坑口则比较凌乱。此后,弹丸进入稳定的侵彻阶段,此时激波已经很弱,弹头形状的影响可以忽略。由于假设弹丸的强度远大于靶板,侵彻过程弹丸不发生形变,所以坑

底形状与弹头形状基本一致。

### 4 结论

圆锥形头部的弹丸在侵彻薄板时能够获得更大截面的弹坑,具有更强的侵彻能力;半球形头部的弹丸则在侵彻半无限厚靶板时具有更大的侵彻深度;弹丸长径比越大,弹丸的侵彻深度越大,但这种影响随着长径比的增大而逐渐减弱。所以,在进行弹丸设计时,针对不同的攻击对象,弹丸头部形状也应有所变化,对于侵彻薄板目标,要使形成的弹洞尽量大,所以最好选用圆锥形头部的弹丸;而对于侵彻具有较厚防护层的目标,侵彻深度要深,弹丸的头部形状则应选择半球形。虽然长径比越大弹丸对目标的侵彻能力越强,但由于这种影响随着长径比的增大而减小,且过小的弹径将影响弹头部的装药量和运动稳定性,所以,弹丸的长径比还应权衡目标特性和毁伤要求等来进行合理设计。此外在进行具体的弹丸设计时,还需针对实际弹靶材料,考

虑弹丸材料的失效特性进行更细致的研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 何涛,杨竞,金鑫,等. ANSYS 10.0/LS-DYNA 非线性有限元分析实例指导教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2007: 308-323.
- [4] LSTC. LS-DYNA theoretical manual[M]. USA: Livermore Software Technology Corporation, 1998.
- [5] 马文来,张伟,庞宝君,等. 超高速撞击弹丸形状效应数值模拟研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(6): 1174-1177.
- [6] Kamran DANESHJOU, Majid SHAHRAVI. Comparative study of nose profile role in long-rod penetration[J]. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2007, 1(5): 635-643.

(上接第 134 页)

表 2 破片临界起爆速度计算结果

破片质量/g	破片半径/mm	等效半径/mm	临界起爆速度/(m/s)
1.0	1.308	1.236	1236.4
1.5	1.765	1.065	1064.6
2.0	2.111	0.973	973.4
2.5	2.397	0.913	913.5
3.0	2.644	0.870	869.8
3.5	2.863	0.836	835.9
4.0	3.060	0.808	808.4

### 3 结论

由表 1 的试验结果和表 2 的计算结果相结合可以看出:当 1.0g 破片以 1279.8m/s 的速度冲击试验装药时,起爆比例为 70%;而计算给出当冲击速度为比试验值略低的 1236.4m/s 时,对应临界起爆速度的预测起爆概率为 50%。因此,可以认为试验结果与计算结果相吻合,所提出的圆柱形破片冲击薄盖板装药的临界起爆速度计算模型和计算方法能够反应客观实际。对于其它质量的破片,试验速度远大于临界起爆速度,试验得到的起爆比例均为 100%,这也一定

程度上支持了上述观点。另外,文中的研究结果间接地证明了 Cook<sup>[4]</sup>等人的研究成果,即薄盖板主要起减小破片作用直径和炸药受载面积的作用,相当于减小了冲击波波阵面平面部分的面积。综上所述,给出结论如下:

1)通过破片对薄盖板装药冲击起爆试验,获得了具有工程实际意义的试验数据,所提出的临界起爆速度的计算模型和方法在工程上具有推广和应用价值;

2)破片对薄盖板装药的冲击起爆,主要是冲击波起爆机理,由波阵面平面部分起主要作用,盖板主要起减小波阵面平面部分面积的作用。

参考文献:

- [1] Held M. Initiation phenomena with shaped charge jets[C]// Proceedings of 9th Symposium International on Detonation. Portland, 1989:1416-1426.
- [2] 孙承纬,卫玉章,周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京:国防工业出版社, 2000: 415-436.
- [3] 章冠人,陈大年. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京:国防工业出版社, 1991: 90-109.
- [4] Cook M P, Haskins P J, James H R. Projectile Impact Initiation of Explosive Charges[C]// Proceedings of 9th Symposium International on Detonation. Portland, 1989: 1441-1450.