

## 球头弹低速斜侵彻下靶板穿甲破坏机理\*

徐伟, 陈长海, 侯海量, 朱锡, 李茂  
(海军工程大学舰船工程系, 湖北武汉 430033)

**摘要:**为探讨球头弹低速斜侵彻下靶板的破坏机理,通过系列弹道试验,对比分析不同初始速度下弹体的变形、靶板的破坏模式以及靶板的破口大小和形状;同时采用 ANSYS/LS-DYNA 对弹靶作用过程进行数值模拟。结果表明:低速斜侵彻下靶板响应非完全对称,根据受力特征可将靶板划分为四个不同区域,即接触区、弯曲区、拉伸区、对称区;薄板的穿甲破坏可分为四个不同的阶段,即隆起变形、碟形变形、弯曲变形、弹体贯穿阶段;不同初始速度下靶板出现四种典型的穿甲破坏模式,随着初始速度的增加依次为隆起—碟形变形、隆起—碟形变形—拉弯撕裂破坏、隆起—碟形变形—拉弯剪切破坏、隆起—拉弯剪切破坏。斜侵彻下靶板破口形状为椭圆形,随着初始速度的增加,破口长径不断减小,形状由椭圆形向卵形过渡。

**关键词:**穿甲力学;低速冲击;斜侵彻;失效模式

**中图分类号:** O385 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2018)01-049-07

## Investigation on perforation mechanism of targets impacted obliquely by projectiles with hemispherical nose in low velocity

XU Wei, CHEN Changhai, HOU Hailiang, ZHU Xi, LI Mao

(Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** To explore the failure modes of the targets subjected to oblique impact of the projectiles with hemispherical nose, ballistic tests were carried out and the attitude of the projectiles was captured with the high-speed camera. The damage modes of projectiles as well as targets were analyzed and the apertures of the targets were measured. It was shown that the dynamic response of the target was not completely symmetric under oblique impact and the target was divided into four partitions according to the mechanic characteristics, which were contact area, bending area, tensile area and symmetric area. The penetration process was divided into four stages which was bulge, dishing, bending and perforating, according to the deformation modes. The failure modes of the targets consist of four typical patterns with the variation of the initial velocity of the missiles. The first one was bulge-dishing deformation when the initial velocity was low to the ballistic limit. The second one was bulge-dishing-tensile & bend tearing when the velocity was higher. The third one was bulge-dishing-tensile & bend shearing with the increase of the velocity. The fourth one was bulge-tensile & bend shearing when the velocity was largely higher than the ballistic velocity. The aperture of the targets in the front view was elliptical when subjected to oblique impact of the projectiles with hemispherical nose and it was gradually transferred to the oval with the increase of the velocity.

**Key words:** perforation mechanics; low-velocity impact; oblique perforation; failure modes

穿甲侵彻过程是非常复杂的力学行为,涉及应力波的相互作用,材料的热固耦合及应变率效应等<sup>[1]</sup>,弹靶相互作用影响因素复杂,例如弹体材料、几何形状和初始速度以及靶板材料、厚度和组合方式以及侵彻角度等,不同条件下弹体的侵彻性能和靶板的失效模式存在较大差别。文献[2-4]针对不同头部形状弹体的侵彻性能开展了实验和数值研究,指出不同弹头形状下靶板的失效模式并不相同。Gupta等<sup>[2]</sup>认为当靶板较

薄时,球头弹的动能消耗于塞块的形成和靶板的撕裂,靶板首先出现拉伸变薄,随后在局部区域形成裂纹,裂纹的进一步扩展造成靶板失效。文献[5-10]深入研究了球头弹冲击下靶板的响应。由于弹体自身质量、空气阻力等的影响,弹体在接触目标靶板时会存在初始侵彻角度或攻角,同时当目标靶板倾斜放置时,同样存在非正侵彻的情形,其与正侵彻存在较大差异。弹体在斜侵彻过程中,受力非完全对称,弹体在受到轴向阻力

\* 收稿日期:2016-11-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51409253);国家安全重大基础研究资助项目(6133050102)

作者简介:徐伟(1992—),男,湖北天门人,博士研究生,E-mail: weixu06@163.com;

陈长海(通信作者),男,讲师,博士,E-mail: chenchanghai0746@163.com

的同时由于弯矩的作用,使得其在侵彻过程中发生偏转<sup>[11]</sup>。Gupta 等<sup>[12-13]</sup>先后开展了系列实验研究,分析了单层和多层不同厚度的靶板在正侵彻与斜侵彻条件下的抗弹性能,在初速恒定时拟合了初速与余速速度差随侵彻角度的变化曲线,从而得出了剩余速度的半经验公式。Roisman 等<sup>[14]</sup>推导了刚性弹斜侵彻弹塑性靶板的近似理论解,弹体速度场包含轴向速度、径向速度和旋转角速度,靶板分为弹性区和刚塑性区,该理论模型与实验结果吻合较好。Goldsmith<sup>[15]</sup>总结了非理性侵彻条件下的相关理论和实验研究,着重于弹体在侵彻过程中的偏转以及跳飞。国内学者针对斜侵彻问题开展了一定的数值和理论研究<sup>[16-22]</sup>,但相关试验还有待深入。

## 1 试验设计

弹道试验采用 14.5 mm 口径的滑膛枪,通过火药量控制弹体初始速度。采用激光测速系测量弹体初速及末速。同时采用高速摄影仪记录弹体的侵彻过程。靶板材料为 Q235 钢,靶板尺寸为 400 mm × 400 mm × 2 mm,靶板上呈圆形均匀分布 12 个螺栓孔,通过 12 个 M8 螺栓固定于靶架上,靶架上的圆形开孔半径为 175 mm,即靶板的自由跨度为 350 mm。试验采用长径比  $L/D$  为 1 的球头弹,弹体直径  $D$  为 14.5 mm,长度  $L$  为 14.5 mm,质量为 15.6 g,弹体材料为经淬火处理的 45#钢,弹体和靶板的准静态力学性能参数见表 1。表中, $\rho$  为质量密度, $E$  为杨氏弹性模量, $\nu$  为泊松比, $\sigma_y$  和  $\sigma_b$  分别为压缩和拉伸强度。

试验初速在 150 m/s ~ 450 m/s 之间,主要用于模拟战斗部侵彻防护外板的情形。

表 1 弹丸和靶板的准静态力学性能参数

Tab. 1 Quasi-static mechanical property of projectile and target

材料	$\rho /$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$E /$ GPa	$\nu$	$\sigma_y /$ MPa	$\sigma_b /$ MPa
45#钢	7800	205	0.3	355	685
Q235 钢	7800	210	0.3	235	490

## 2 数值计算模型

采用 ANSYS/LS-DYNA 建立三维有限元模型,弹体和靶板均采用六面体单元。靶板中心 4 倍弹径内网格尺寸为 0.75 mm,4 倍弹径外采用放射性网格,靶板在厚度方向划分 10 个单元。弹

体与靶板之间采用面面侵彻接触。靶板材料采用双线性弹塑性本构模型,材料的应变率效应由 Cowper-Symonds 模型描述,弹体材料采用 Johnson-Cook 本构模型,考虑应变率效应。弹体和靶板材料参数见表 2。

表 2 弹丸和靶板材料参数

Tab. 2 Material parameters of projectiles and targets

弹体		靶体	
参数	数值	参数	数值
$A/\text{MPa}$	1400	$\sigma_0/\text{MPa}$	235
$B/\text{MPa}$	510	$E_n/\text{MPa}$	250
$n$	0.296	$D/\text{s}^{-1}$	40.4
$C$	0.014	$n$	5
$\dot{\epsilon}_{\rho 0}$	1	$\epsilon_f$	0.42

## 3 试验及仿真结果

表 3 为弹道试验得到的初始和剩余速度数据以及相应的仿真值。其中,靶板倾斜  $60^\circ$ ,弹体水平运动,即弹体侵彻角为  $30^\circ$ 。其中,弹体初速和余速采用激光测速仪测得,其速度大小为水平速度。

## 4 结果分析

### 4.1 弹体变形

斜侵彻条件下,弹靶接触时间变长,弹体头部会产生向尾部传播的压缩波,弹体出现变形;同时,弹靶接触过程中,其受力不均匀,弹体两侧变形并不对称,近靶侧(率先接触靶板一侧)接触时间长,弹体变形较为明显,与之相对远靶侧几乎没有变形。图 1 为试验后弹体变形形貌。由图 1 可知,弹体头部变形较小,弹体近靶侧边变形较大;随着初始速度的增加,近靶侧弹体头部变形增大,弹体侧边变形减小。原因在于弹体头部为完全对称的球形,斜侵彻条件下,当弹体初速较小时,弹靶接触过程中弹体头部沿靶板自然滑移,弹体头部与靶板之间作用力较小,弹体侧边与靶板接触时间较长,因而弹体头部变形小,弹体侧边变形大;当弹体初速较大时,其径直穿透靶板,相应地滑移位移较小,主要承压区为弹体头部,因而弹体头部变形较大,弹体侧边变形较小。同时弹体质量变化很小,可忽略不计。

弹体变形随初始速度的变化趋势表明,弹体初速较小时弹靶作用时间长且接触区域较大,随着初始速度的增加,弹靶作用时间变短且接触区域变小。

表 3 试验和仿真结果及主要参数

Tab.3 Experimental and simulation results and main parameters

序号	靶板厚度/mm	弹体长径比	侵彻角/ (°)	弹体初速/ (m · s <sup>-1</sup> )	弹体余速/ (m · s <sup>-1</sup> )	弹体余速(仿真)/ (m · s <sup>-1</sup> )	破坏情况
1	2	1	30	153.85	0	0	隆起变形
2	2	1	30	260.48	139.24	149	穿透
3	2	1	30	261.28	140.09	151	穿透
4	2	1	30	297.55	185.89	202	穿透
5	2	1	30	362.26	254.13	275	穿透
6	2	1	30	476.45	361	382	穿透

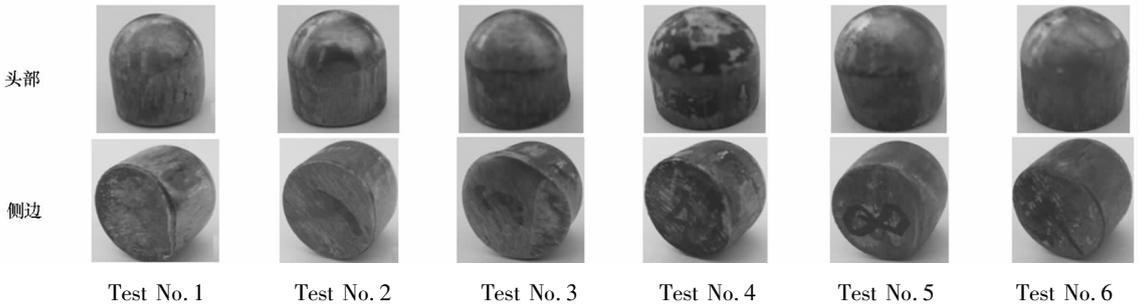


图 1 试验后弹体变形破坏形貌

Fig.1 Deformation and damage view of projectiles after tests

4.2 破坏过程及机理

正侵彻条件下,弹体运动垂直于靶板,弹靶之间作用力完全对称,相应地靶板响应也完全对称。然而斜侵彻条件下,弹体与靶板不垂直,弹体运动可分解为垂直于靶板方向(法向)和平行于靶板方向(切向),如图 2 所示。

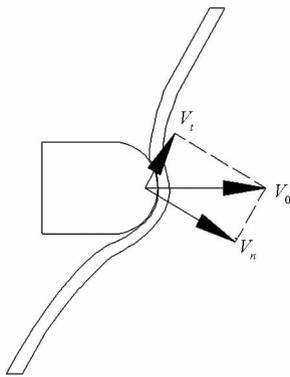


图 2 弹靶作用示意图

Fig.2 Schematic of penetrator on target

图 3 为斜穿甲过程中薄板板内的广义应力图,其中:  $T = \frac{H}{10} \sum_{i=1}^{10} \sigma_i$ ,  $M = \left(\frac{H}{10}\right)^2 \sum_{i=1}^{10} \sigma_i(i - 5.5)$  分别为单位长度上的膜力、弯矩( $\sigma_i$  为第  $i$  层单元上的正应力);  $T_0 = \sigma_0 H$ ,  $M_0 = \sigma_0 H^2 / 4$ , 分别为

薄板单位长度上的极限膜力、极限弯矩;横坐标采用无量纲参数  $r'$ ,  $r' = r/Rp$ , 其中  $r$  为靶板上各点到撞击中心的距离,  $Rp$  为弹体半径,坐标“0”点为撞击点,切向为弹体速度沿靶板的投影方向,顺速度投影所在方向为正,逆速度投影所在方向为负,侧向与靶板切向垂直。

由图 3 可知,侧向膜力和弯矩是完全对称的,原因在于靶板侧向区域只受弹体法向运动的影响,法向运动下靶板响应类似正侵彻,因而靶板响应是对称的,相应地,膜力和弯矩相对撞击点对称。撞击点切向两侧除了受法向运动的作用外,同样受弹体切向运动的影响。切向运动的方向性使得撞击点切向两侧的靶板响应各不相同:正向区域的靶板由于弯矩作用而出现较大程度的弯曲,相应地,正向弯矩大于负向弯矩;负向区域的靶板由于弹体运动而出现一定程度的拉伸,相应地,正向膜力小于负向膜力。

根据靶板变形机理的不同可以将靶板响应划分为四个不同区域,如图 4 所示。由于切向速度的影响,弹靶直接接触区域近似为椭圆形(接触区);切向速度所在方向区域的靶板由于切向运动而出现较大程度的弯曲(弯曲区),与之相对的切向速度所在反方向区域的靶板出现一定程度的

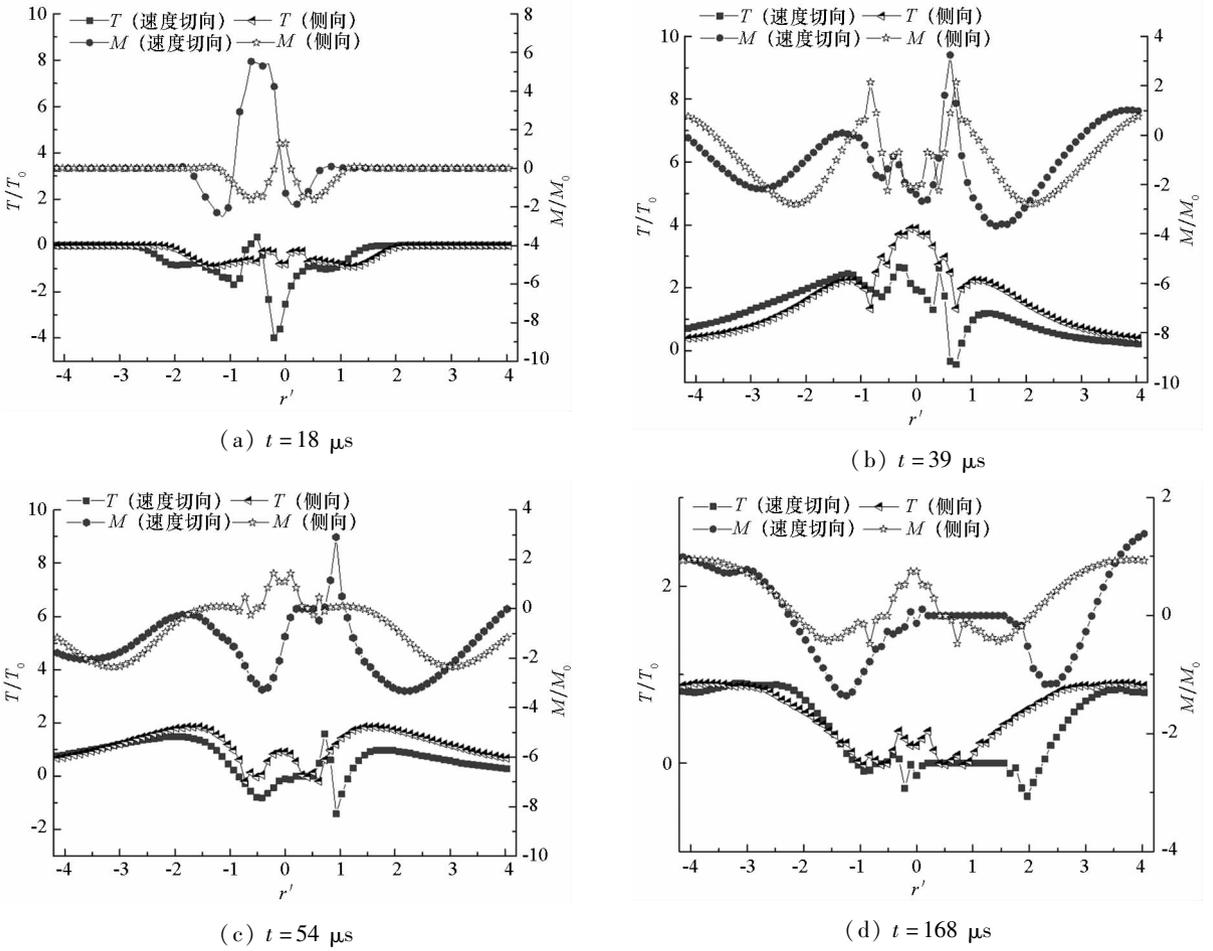


图 3 薄板板内广义应力分布图 ( $V_0 = 261 \text{ m/s}$ )

Fig. 3 Generalized stress distribution in thin-plate ( $V_0 = 261 \text{ m/s}$ )

拉伸(拉伸区);垂直于切向速度两侧的靶板区域主要受法向运动的影响,其与正侵彻情形类似(对称区)。

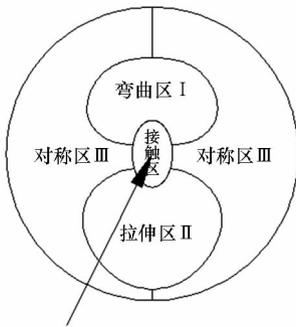


图 4 靶板区域划分图  
Fig. 4 Partition of target

弹靶侵彻过程可分为如下几个阶段,如图 5 所示。弹靶接触的初始阶段,接触区靶板材料贴于弹头表面并与弹体一起运动,随着弹体的运动,在靶板冲击区形成隆起变形(隆起变形阶段),由于接触时间短,切向速度的影响尚可忽略不计,此阶段靶板响应类似于正侵彻;弹靶接触区靶板与弹体存在速度差并产生压缩应力,同时接触区由

于隆起出现薄膜拉伸,接触区靶板变薄。随着弹体运动,其法向速度不断降低,隆起区的扩展速度也随之降低,当隆起区的扩展速度小于塑性应力波的传播速度时,塑性波向外扩展,从而产生径向和横向塑性变形(碟形变形阶段);此阶段弹靶作用时间已较长,切向速度的影响不可忽略,与正侵彻不同,斜侵彻下靶板的碟形变形并不完全对称,切向速度所在方向靶板变形较大。隆起和碟形变形后,弹靶接触区由于薄膜拉伸使靶板不断变薄,随着弹体的进一步运动,其产生裂纹并扩展为开口,由于切向速度的影响,撞击点正向区域的靶板材料在弹体推挤作用下绕“塑性铰”不断转动,撞击点负向区域的靶板材料在横向拉伸作用下进一步变薄,靶板开口不断扩大(弯曲变形阶段);此阶段弹体法向速度仍较大,靶板的碟形变形范围和大小进一步扩大。当弯曲区靶板材料与弹体运动方向相同且靶板开口大于弹体直径时,弹体顺着开口穿透靶板(弹体贯穿阶段),由于上述过程中,弹体受力并不均匀,从而穿透阶段弹体具有一定角速度,弹体在侵彻过程中向下运动且自身发



图 5 穿甲破坏过程图  
Fig. 5 Process of perforation

生偏转。不同角度下弹体侵彻过程大致相同,仅各阶段的起止时间和变形区域及程度存在略微差别。

### 4.3 靶板失效模式

根据上述分析可知,弯曲区内部存在较大的弯矩和膜力,拉伸区主要为膜力作用,对称区主要为膜力作用且存在一定的弯矩,各靶板区域在弹靶接触区边缘存在剪力;上述各作用力大小和作用时间因弹体初速的不同而存在一定差异,相应产生不同的穿甲破坏模式。

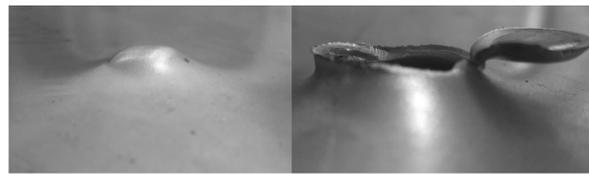
当初始速度较小低于弹道极限时,弹体未能穿透靶板,靶板仅经历隆起和碟形变形,弯曲区由于弯矩作用其变形曲率较大,拉伸区由于拉伸作用其曲率变化相对较缓。变形区域:弯曲区 < 拉伸区;曲率大小:拉伸区 < 对称区 < 弯曲区。靶板的变形模式为隆起—碟形变形,如图 6(a)所示。

当初始速度略大于弹道极限时,弹体穿透靶板,在经历隆起和碟形变形后,弹体速度较小,弹靶接触区由于薄膜拉伸使靶板不断变薄,随着弹体的进一步运动,其产生裂纹并扩展为开口,在切向速度的影响下弯曲区由于弯矩作用产生较大的弯曲变形,在接触区边缘由于薄膜拉伸而撕裂,在接触区与拉伸区交界处由于应力较小靶板并未脱落,接触区板材在弹体推挤和惯性作用下绕接触区和拉伸区交界处翻转。接触区边界为拉伸撕裂,弯曲区为弯曲变形,对称区为碟形变形,拉伸区同样为碟形变形但由于拉伸作用其曲率变化较小。靶板的失效模式为隆起—碟形变形—拉弯撕裂破坏,如图 6(b)所示。

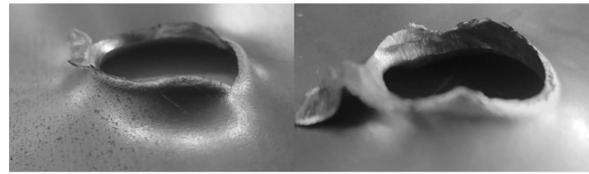
随着初始速度进一步增大,在经历隆起和碟形变形后,法向速度仍旧较大,弹靶接触区两侧(与对称区交界处)靶板发生剪切失效,接触区与

弯曲区交界处发生弯曲与剪切混合失效,接触区与拉伸区交界处则主要为拉伸与剪切混合失效,弹体从靶板上剪下一块形状贴近弹体侧边的失效块,靶板的失效模式为隆起—碟形变形—拉弯剪切破坏,如图 6(c)所示。由于初始速度较大,隆起和碟形变形时间较短,相应地,靶板变形较小。

当初始速度更大时,弹靶作用时间进一步减小,靶板变形扩展速度大于塑性波速,靶板不会出现典型的碟形变形,其变形更加局部化,弹体从靶板上剪下一块形状贴近弹体侧边的失效块,相对于速度较低的情形,失效块尺寸减小。由于碟形变形弱化,靶板的失效模式为隆起—拉弯剪切破坏,如图 6(d)所示。



(a) 隆起—碟形变形  
(a) Bulge - dishing  
(b) 隆起—碟形变形—拉弯撕裂破坏  
(b) Bulge - dishing - tensile & bend tearing



(c) 隆起—碟形变形—拉弯剪切破坏  
(c) Bulge - dishing - tensile & bend shearing  
(d) 隆起—拉弯剪切破坏  
(d) Bulge - tensile & bend shearing

图 6 靶板失效模式图

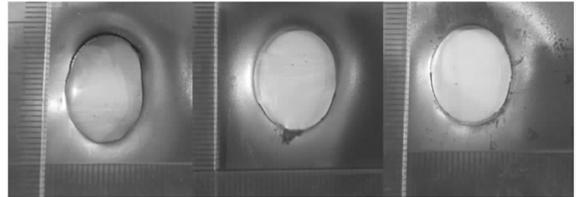
Fig. 6 Typical failure modes of the targets

### 4.4 破口大小

通过观察靶板正面的破口形状可知,当初始速度较小时,靶板的失效模式为隆起—碟形变形—拉弯撕裂破坏,由于弹靶作用时间较长,弹体的横向位移较大,因而正面破口形状较为狭长,其形状类似于椭圆形,如图 7(a)所示。当弹体初始速度较大时,靶板的失效模式为隆起—碟形变形—拉弯剪切破坏,由于弹体靶作用时间变短,其横向位移较小,因而其破口长度也变短,其椭圆形的长轴变短,如图 7(b)所示。当弹体速度进一步增大时,靶板的失效模式为隆起—拉弯剪切破坏,由于弹靶作用时间更短,其横向位移进一步减小,同时由于隆起阶段弹体受力不均匀,使得弹体产

生一定偏移,其对靶板另一端的冲击更大,从而使得破口横向间距变大,其形状由椭圆形转变为上凸下尖的卵形,如图 7(c)所示。

表 3 列出了不同初始速度下破口最大长度  $a$  与最大宽度  $b$ 。实验序号由 1~6 初始速度不断增加,由表可知,随着初始速度的增加,破口长径不断减小,破口短径不断增大,破口形状由椭圆形逐渐变为卵形。



(a)  $V_0 = 260 \text{ m/s}$  (b)  $V_0 = 298 \text{ m/s}$  (c)  $V_0 = 476 \text{ m/s}$

图 7 靶板正面破口图

Fig. 7 Typical apertures of the targets in the front view

表 3 靶板破口长径与短径值

Tab. 3 Long and short diameters of the apertures

	$V_0 / (\text{m/s})$					
	154	260	261	298	362	476
长径 $a/\text{mm}$	18.2	24.1	23.5	21.5	21.2	20
短径 $b/\text{mm}$	14.5	15.5	15.5	15.5	16	16.5

## 5 结论

1) 斜侵彻下球头弹体头部变形较小,近靶侧(率先接触靶板一侧)变形较大;随着初始速度的增加,近靶侧弹体头部变形增大,侧边变形减小。

2) 低速斜侵彻下靶板响应非完全对称,根据受力特征可将靶板划分为四个不同区域,即接触区(近似椭圆形)、弯曲区(弯矩较大)、拉伸区(膜力较大)和对称区(近似正侵彻)。

3) 球头弹斜侵彻下薄板的穿甲破坏可分为四个阶段,即隆起变形阶段、碟形变形阶段、弯曲变形阶段和弹体贯穿阶段,不同角度下弹体侵彻过程大致相同,仅各阶段的起止时间和变形区域及程度存在略微差别。

4) 不同初始速度下靶板有四种典型的穿甲破坏模式。随着初始速度的增加依次隆起—碟形变形、隆起—碟形变形—拉弯撕裂破坏、隆起—碟形变形—拉弯剪切破坏、隆起—拉弯剪切破坏。

5) 斜侵彻下靶板破口形状为椭圆形。随着初始速度的增加,弹靶作用时间变短,靶板正面破口长径不断减小,破口形状由椭圆形向卵形过渡。

## 参考文献 (References)

- [1] Dey S, Børvik T, Hopperstad O S, et al. On the influence of constitutive relation in projectile impact of steel plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(3): 464–486.
- [2] Gupta N K, Iqbal M A, Sekhon G S. Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on the deformation behavior of layered plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(1): 37–60.
- [3] Børvik T, Hopperstad O S, Berstad T, et al. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses; Part II: numerical simulations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(1): 37–64.
- [4] Børvik T, Langseth M, Hopperstad O S, et al. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses; Part I: experimental study [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(1): 19–35.
- [5] Lee Y W, Woertz J C, Wierzbicki T. Fracture prediction of thin plates under hemi-spherical punch with calibration and experimental verification [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2004, 46(5): 751–781.
- [6] Rusinek A, Rodriguez-Martinez J A, Zaera R, et al. Experimental and numerical study on the perforation process of mild steel sheets subjected to perpendicular impact by hemispherical projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(4): 565–587.
- [7] 侯海量, 朱锡, 李伟, 等. 低速大质量球头弹冲击下薄板穿甲破坏机理数值分析 [J]. *振动与冲击*, 2008, 27(1): 40–45, 181.  
HOU Hailiang, ZHU Xi, LI Wei, et al. Numerical analysis on the perforation mechanism of thin plate subjected to impact by hemispherical-nosed projectiles with low velocity [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(1): 40–45, 181. (in Chinese)
- [8] 侯海量, 朱锡, 李伟, 等. 低速大质量球头弹冲击下薄板塑性动力响应分析 [J]. *海军工程大学学报*, 2010, 22(5): 56–61.  
HOU Hailiang, ZHU Xi, LI Wei, et al. Dynamic plastic response of thin plate subjected to impact of spherical-nosed projectile with low velocity [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2010, 22(5): 56–61. (in Chinese)
- [9] 陈长海, 朱锡, 侯海量, 等. 球头弹丸低速冲击下薄板大变形的理论计算 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(12): 88–93.  
CHEN Changhai, ZHU Xi, HOU Hailiang, et al. Theoretical calculation of large deformation for thin plate impacted by hemispherical-nosed projectiles with low velocity [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 40(12): 88–93. (in Chinese)
- [10] 邓云飞, 孟凡柱, 李剑锋, 等. Q235 钢板对半球形头弹抗侵彻特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(3): 386–392.  
DENG Yunfei, MENG Fanzhu, LI Jianfeng, et al. The ballistic performance of Q235 metal plates subjected to impact by hemispherically-nosed projectiles [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(3): 386–392. (in Chinese)
- [11] Backman M E, Goldsmith W. The mechanics of penetration of projectiles into targets [J]. *International Journal of Engineering Science*, 1978, 16(1): 1–99.
- [12] Gupta N K, Madhu V. Normal and oblique impact of a kinetic energy projectile on mild steel plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1992, 12(3): 333–343.
- [13] Gupta N K, Madhu V. An experimental study of normal and oblique impact of hard-core projectile on single and layered plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(5/6): 395–414.
- [14] Roisman I V, Yarin A L, Rubin M B. Oblique penetration of a rigid projectile into an elastic-plastic target [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(9/10): 769–795.
- [15] Goldsmith W. Non-ideal projectile impact on targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 22(2/3): 95–395.
- [16] 尹放林, 王明洋, 钱七虎, 等. 弹丸斜入射对侵彻深度的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 1998, 18(1): 69–76.  
YIN Fanglin, WANG Mingyang, QIAN Qihu, et al. Penetration depth of projectile oblique into target [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1998, 18(1): 69–76. (in Chinese)
- [17] 陈小伟, 李维, 宋成. 细长尖头刚性弹对金属靶板的斜侵彻/穿甲分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(5): 393–399.  
CHEN Xiaowei, LI Wei, SONG Cheng. Oblique penetration/perforation of metallic plates by rigid projectiles with slender bodies and sharp noses [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(5): 393–399. (in Chinese)
- [18] 徐双喜, 吴卫国, 李晓彬, 等. 锥头弹小斜角侵彻薄板剩余速度理论分析 [J]. *弹道学报*, 2010, 22(3): 58–62.  
XU Shuangxi, WU Weiguo, LI Xiaobin, et al. Theoretical analysis on residual velocity of conical projectile after penetrating thin plate at low oblique angle [J]. *Journal of Ballistics*, 2010, 22(3): 58–62. (in Chinese)
- [19] Xu S X, Wu W G, Li X B, et al. Petal failure characteristics of a conical projectile penetrating a thin plate at high oblique angle [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2010, 15(4): 434–440.
- [20] 皮爱国, 黄风雷. 大长细比弹体斜侵彻混凝土靶的动力学响应 [J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27(4): 331–338.  
PI Aiguo, HUANG Fenglei. Dynamic behavior of a slender projectile on oblique penetrating into concrete target [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(4): 331–338. (in Chinese)
- [21] 龚自明, 方秦, 张亚栋, 等. 钢制长杆弹斜侵彻中厚靶板数值模拟 [J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2001, 02(4): 66–70.  
GONG Ziming, FANG Qin, ZHANG Yadong, et al. Numerical simulation of long rod steel projectile penetrating into moderately thick targets [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science)*, 2001, 02(4): 66–70. (in Chinese)
- [22] 马爱娥, 黄风雷. 弹体斜侵彻钢筋混凝土的试验研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2007, 27(6): 482–486.  
MA Aie, HUANG Fenglei. Experimental research on oblique penetration into reinforced concrete [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, 27(6): 482–486. (in Chinese)