文章编号：1000-5773(2012)01-0069-07

锥头弹丸穿透薄钢板的实验研究*

孙炜海[1]，鞠桂玲[2]，陈德民[1]，杨班权[1]

(1.装甲兵工程学院机械系，北京　100072；
2.装甲兵工程学院基础部，北京　100072)

摘要：为了研究延性薄靶的穿透性能，进行了90°锥头弹丸穿透薄钢板的准静态和动态实验。通过准静态实验，得到了4种不同厚度钢板的载荷-压入位移曲线及破坏模式；结合膜力理论模型及纯弯静塑性破坏模型，对实验结果进行了分析，得出：对于薄靶，大变形膜力起主导作用，随着靶厚增加，弯距在板整体变形过程中的影响逐渐增大。通过动态穿透实验，得到了弹丸穿透4种不同厚度钢板的入射速度、残余速度及靶板破坏模式，计算得到穿透耗能。最后，将准静态实验与动态实验结果进行了对比讨论。

关键词：锥头弹丸；薄钢板；压入；穿透；穿透耗能
中图分类号：O347.1；O385　　**文献标识码**：A

1　引　言

金属靶板具有良好的防护性能和较高的性价比，常用在各种防护结构中。载荷作用下金属靶板的变形往往是拉伸、弯曲、剪切等联合作用的复杂过程。随着撞击速度、弹靶几何尺寸和材料性能的变化，穿透过程、靶板破坏模式和穿透耗能等也不相同，目前这方面的内容仍是各国学者的研究热点之一[1-3]。

在准静态和低速加载时，薄靶板的整体变形相当大，未发生穿透时甚至可以忽略局部变形而只考虑靶板的整体响应；高速撞击时，靶板整体变形的影响将不明显，此时只需考虑局部变形。Corbett等人[4]研究了球头和平头弹丸对简支靶板的穿透，进行了准静态和动态穿透实验。Wen等人[5]建立了一个考虑整体响应和局部变形的平头弹撞击简支靶板模型，模拟结果与实验结果吻合良好。Bøvik等人[6]对尖头弹撞击不同厚度的铝靶进行了系列实验研究，靶板的破坏模式为花瓣型或扩孔型。

本研究开展90°锥头弹丸穿透薄钢板的准静态和动态实验。准静态压入实验在MTS试验机上进行，对4种不同厚度的A3钢板进行压入实验，获取相应的载荷-压入位移曲线，结合理论模型对实验结果进行分析。动态穿透实验利用火药枪发射装置，获取弹丸穿透4种不同厚度A3钢板的入射速度和残余速度，计算靶板的穿透耗能，并将准静态和动态实验结果进行对比讨论。

2　薄靶的准静态压入

2.1　靶板的受力分析

靶板在准静态加载下的变形往往是在板内拉应力、弯曲应力及剪应力这3种应力的联合作用下产生的，并且靶厚不同时，主导作用力不同。对于薄靶，板内拉应力表现为膜力，在靶板中心挠度大于其厚度的一半时，为了简化问题，常常只考虑膜力；对于较厚的靶板，变形阶段弯曲应力占主导地位，破坏时常常是剪应力起主要作用。

2.1.1　膜力分析模型

*　**收稿日期**：2010-07-23；**修回日期**：2010-10-12
基金项目：装甲兵工程学院创新基金(2011CJ023)
作者简介：孙炜海(1982－)，男，博士，讲师，主要从事冲击动力学研究. E-mail：weihai_sun@163.com

半径为 R 的固支圆板，中间受均布载荷 p 作用，作用半径为 a。采用理想刚塑性理论，并假定变形前距中心距离为 r 的点在变形后距中心的径向距离仍为 r，不考虑局部变形与失效，有如下平衡方程。

当 $r<a$ 时

$$\begin{cases} rN_\varphi \dfrac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}r^2} + N_\theta \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}r} + pr = 0 \\ 2N_\varphi \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}r} + pr = 0 \end{cases} \tag{1}$$

当 $a<r<R$ 时

$$\begin{cases} rN_\varphi \dfrac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}r^2} + N_\theta \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}r} = 0 \\ 2rN_\varphi \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}r} + pa^2 = 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中：N_θ、N_φ、y 分别为板内的环向膜力、切向膜力、距离中心为 r 处的挠度。利用 Tresca 屈服条件及理想刚塑性假设，可以解得

$$y = \begin{cases} -\dfrac{pr^2}{4N_0} + \delta & 0 < r < a \\ -\dfrac{pa^2}{2N_0} \ln \dfrac{r}{R} & a < r < R \end{cases} \tag{3}$$

利用 $r=a$ 处 y 的连续性条件，得到

$$P = 2\pi N_0 \frac{\delta}{\ln(R/a) + 1/2} \tag{4}$$

式中：$P=\pi a^2 p$ 为外加载荷，$N_0=\sigma_y H$ 为全塑性膜力，σ_y 为屈服应力，H 为靶厚；δ 为靶板中心的挠度。

2.1.2 受集中载荷作用的板的静塑性破坏

当板的挠度很小时，板中的弯曲应力起主导作用，只考虑弯曲时，对于任意形状的刚性理想塑性板及任意固定程度的边界，引起静塑性破坏所需的集中载荷为[7]

$$P_0 = 2\pi M_0 \tag{5}$$

式中：$M_0=\sigma_y H^2/4$ 为单位宽度实心横截面的塑性破坏弯矩。

2.2 实验装置

在 MTS 试验机上利用 90°锥角的压头对 4 种不同厚度(1.0、2.0、2.7 和 4.0 mm)的 A3 薄钢板进行准静态压入实验，实验装置见图 1。MTS 试验机的位移加载速率为 0.05 mm/s，采样频率为10 s^{-1}。试件通过 8 个螺钉固定在夹具的上、下两部分之间，夹具外径为 230 mm，内径为 150 mm。压头前端细长部分直径为 7.6 mm，最前端尖头部分锥角为 90°，头部经过热处理，压入过程中不会发生塑性变形。试件为 230 mm×230 mm 的 A3 钢板，板上与夹具对应的位置上开 8 个用于固定的等间距圆孔。

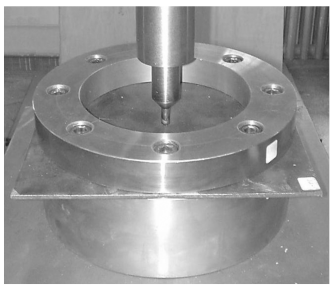


图 1 准静态压入实验装置

Fig. 1 Quasi-static test arrangement

2.3 实验结果与分析

材料的力学性能由准静态拉伸实验得到，每种厚度的靶板沿轧制方向和垂直方向各制作 3 个拉伸试件，对同一厚度靶板测得的实验数据取平均，得到相应的屈服应力(σ_y)、极限应力(σ_u)及延伸率(Δ)，如表 1 所示。薄钢板的准静态穿透破坏模式如图 2、图 3 所示，压入过程中的载荷(P)-压入位移(δ)曲线如图 4～图 7 所示。

表 1 不同厚度钢板的力学性能参数

Table 1 Mechanical parameters of steel plates with different thicknesses

H/(mm)	σ_y/(MPa)	σ_u/(MPa)	Δ/(%)	H/(mm)	σ_y/(MPa)	σ_u/(MPa)	Δ/(%)
1.0	192.4	263.4	20.1	2.7	330.0	457.9	18.3
2.0	222.7	300.4	18.5	4.0	403.0	537.5	11.5

2.3.1 实验现象

1.0 mm 厚钢板在压入过程中由于压头的锥形尖头作用,所受载荷不断增加,当载荷达到 1.83 kN 时,在锥尖处最先产生破裂,在 P-δ 曲线(见图 4)中表现为载荷的一次微小突降,之后破裂继续扩展,最终形成一条沿轧制方向的大裂缝,见图 2。

2.0 和 2.7 mm 厚钢板的压入破坏情况较为类似,为明显的拉剪联合破坏。图 2 给出了 2.7 mm 厚钢板破坏时的背面图,图 3 给出了 2.0 mm 厚钢板压穿后的剖面图。可见,靶板破坏时与压头尖部接触部位明显变薄,鼓包发生开裂,并且板在压头环向周围有明显的拉伸和剪切变形,为拉剪复合破坏模式。

4.0 mm 厚钢板的破坏为剪切冲塞破坏,最终有一个与压头直径相当的靶元被挤凿下来,并且靶元与压头接触面的压痕与压头锥形面完全吻合,破坏后的钢板截面如图 3 所示。

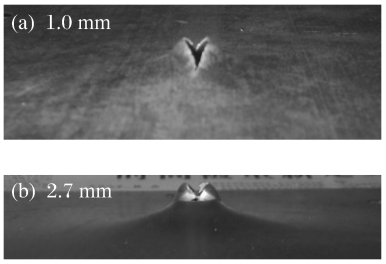


图 2 1.0 和 4.0 mm 厚钢板的准静态压入破坏图

Fig. 2 Quasi-static indentation image of steel plates with thicknesses of 1.0 and 4.0 mm

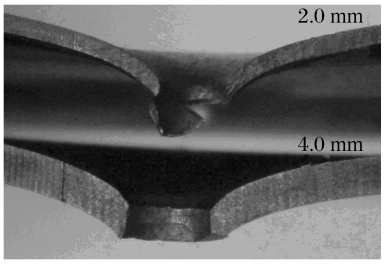


图 3 2.0 和 4.0 mm 厚钢板的准静态压穿剖面图

Fig. 3 Cross-sections of 2.0 and 4.0 mm plates under quasi-static loading

2.3.2 膜力理论解与实验数据的比较

从图 4~图 7 中可以看出,根据(4)式得到的计算结果总体上偏高。这主要是因为:(1)膜力分析时假定变形过程中没有弯矩作用,但随着靶板厚度的增加,在加载开始阶段弯矩作用在固定边界的影响越来越明显;(2)将锥形尖头作用产生的加载近似成一小块区域上的均布载荷而产生的差异。从压穿薄板的剖面图(见图 3)可以看出,在加载区域附近有明显的局部弯曲和变薄现象。这些局部效应会使 P-δ 曲线的斜率降低。

结合实验现象进行分析可知:1.0 mm 厚钢板在膜力占主导地位的变形模式下产生裂缝并逐渐扩大,直至最终被破坏,整个过程中不会发生较大的载荷突变;2.0 和 2.7 mm 厚钢板在整体变形时膜力仍占主导地位,直至最后产生断裂穿孔,但是随着靶厚的增加,弯距在开始阶段的变形机制中影响逐渐增大,在 P-δ 曲线中表现为曲线开始阶段出现凸起;4.0 mm 厚钢板的 P-δ 曲线中,开始阶段的凸起就已明显,反映了靶板初始变形时的弯曲失效机制,失效发生后钢板内便产生塑性流动。在理想刚塑性靶板理论中,没有考虑材料的应变强化及靶板几何形状的变化,一旦塑性流动开始,理论上即使不继续增加载荷,塑性流动仍将进行下去。但实际上,由于材料的应变强化及几何形状变化的影响,随着变形的增加,靶板承受载荷的能力也相应地增加了。

2.3.3 极限载荷与实验数据的比较

由(5)式计算出的有明显弯曲失效机制的 2.7 和 4.0 mm 厚钢板的极限载荷 P_0 分别为 3.78 和 10.03 kN。从图 6、图 7 中可以明显看出,在钢板挠度达到或超过弯曲失效发生的挠度时,P-δ 曲线并没有无限接近于极限载荷 P_0,而是随着载荷的增加而产生大变形,曲线开始阶段的凸起显示了塑性大变形的开始。

由 2.7 和 4.0 mm 厚钢板 P-δ 曲线的弹性段切线与塑性段切线的交点,可以得到 P_0 实验值,分别

为 3.22 和 8.84 kN，比由(5)式计算得到的结果(3.78 和 10.03 kN)低。原因有两方面：局部变形和材料弹塑性效应的影响。在塑性大变形开始阶段，钢板上已经产生了一定程度的压痕，造成了加载区域内钢板厚度减小，降低了这一区域钢板的塑性弯曲力矩。

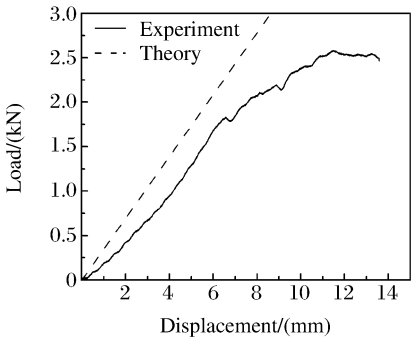


图 4 1.0 mm 厚钢板的静态压入曲线

Fig. 4 Load-deflection curve for the 1.0 mm steel plate

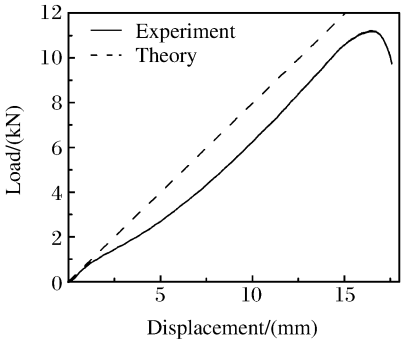


图 5 2.0 mm 厚钢板的静态压入曲线

Fig. 5 Load-deflection curve for the 2.0 mm steel plate

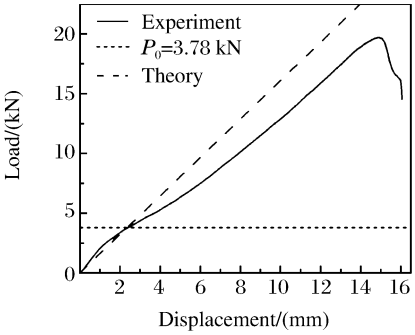


图 6 2.7 mm 厚钢板的静态压入曲线

Fig. 6 Load-deflection curve for the 2.7 mm steel plate

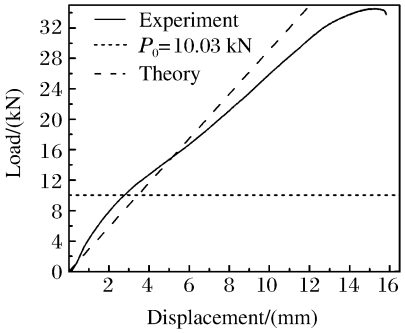


图 7 4.0 mm 厚钢板的静态压入曲线

Fig. 7 Load-deflection curve for the 4.0 mm steel plate

3 薄靶的动态穿透

3.1 实验装置

材料动态贯穿实验设备包括：发射装置、固定装置、测速装置和防护装置。实验时，尖头弹由火药枪发射，所用子弹细长比约为 1∶3，弹体直径为 7.6 mm，锥角为 90°，弹体圆柱部分长度为 20 mm，射出弹丸速度与弹壳内的火药量有关，最高弹速约为 600 m/s，固定靶板的夹具与准静态夹具相同。为了便于比较，所用弹丸的锥角和直径与准静态压头尺寸相同。

3.2 实验现象

1.0 mm 厚钢板在 90°锥头弹丸撞击下，其破坏模式为花瓣型，见图 8，破裂首先从弹尖附近的区域开始扩展，这是因为这部分区域容易产生应力集中。2.0、2.7、4.0 mm 厚钢板的破坏模式为挤凿型破坏，形成的塞子直径与弹体直径相当，塞子形状与弹丸锥头吻合。随着钢板厚度增加，锥形弹头的最尖端有微小变形，穿透 4.0 mm 厚钢板后的回收弹丸和塞块如图 9 所示。随着弹丸入射速度及靶厚增加，靶板破坏时的整体变形及变形区域不断减小，直到无明显整体变形，图 10、图 11 给出了靶板的截面形状比较。

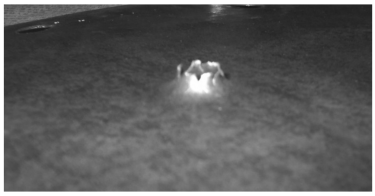


图 8　1.0 mm 厚钢板的花瓣型破坏
Fig. 8　Petalling failure of the 1.0 mm steel plate

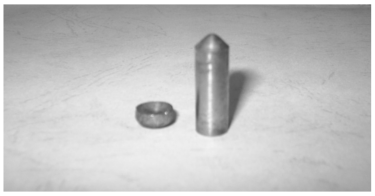


图 9　4.0 mm 厚钢板冲塞及回收弹丸
Fig. 9　Plug of the 4.0 mm steel plate and the recovered projectile

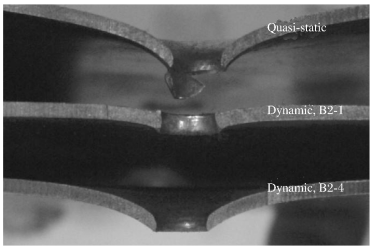


图 10　准静态和动态加载下 2.0 mm 厚钢板的剖面比较
Fig. 10　Comparison of the cross-sections of 2.0 mm steel plates under quasi-static and dynamic loading

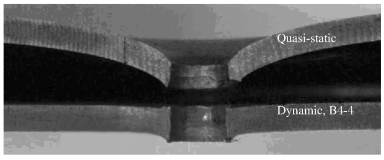


图 11　准静态和动态加载下 4.0 mm 厚钢板的剖面比较
Fig. 11　Comparison of the cross-sections of 4.0 mm steel plates under quasi-static and dynamic loading

3.3　实验数据分析及理论比较

通过实验测得的弹丸初始速度 v_0 和残余速度 v_f,忽略弹丸变形,可以得出靶板穿透耗能 E_d,相应的实验分析数据见表 2。为了便于比较,表 2 还列出了通过积分图 4～图 7 中准静态压入曲线得到的准静态压穿耗能 E_s。

表 2　动态穿透实验数据与耗能计算

Table 2　Experimental data of dynamic penetration and calculated perforation energy

Exp. No.	H/(mm)	m_p/(g)	v_0/(m/s)	v_f/(m/s)	E_d/(J)	E_s/(J)	E_c/(J)
B1-1	1.0	7.48	180.5	154.2	32.9	22.4	16.8
B1-2	1.0	7.53	271.9	257.5	28.7		
B1-3	1.0	7.48	391.6	372.6	54.3		
B1-4	1.0	7.49	201.1	167.6	46.3		
B2-1	2.0	7.55	397.6	344.8	149.3	103.3	63.4
B2-2	2.0	7.55	355.3	296.6	92.3		
B2-3	2.0	7.47	405.9	357.1	139.1		
B2-4	2.0	7.47	197.6	130.5	82.2		
B3-1	2.7	7.50	309.3	230.2	161.3	169.1	108.9
B3-2	2.7	7.48	461.0	383.7	244.4		
B4-1	4.0	7.57	423.7	273.3	396.6	330.3	265.3
B4-2	4.0	7.48	398.9	243.8	372.7		
B4-3	4.0	7.49	540.8	400.5	494.5		
B4-4	4.0	7.48	316.8	131.2	310.9		

根据表 2 中入射速度 v_0 和残余速度 v_f，结合 Recht 等人[8]的弹道极限 v_{bl} 预测公式，得到

$$v_f = \frac{m_p}{m_p + m_{pl}}(v_0^2 - v_{bl}^2)^{1/2} \tag{6}$$

式中：m_p 为弹丸质量；m_{pl} 为形成的塞子质量。对于花瓣型或扩孔型破坏，$m_{pl}=0$；对于冲塞型破坏，可以认为 $m_{pl}=\pi\rho a^2 H$，其中 ρ 为靶板密度。通过最小二乘法拟合，可以得到 1.0、2.0、2.7、4.0 mm 厚靶板的弹道极限分别为 67、130、164 及 266 m/s。如图 12 所示，理论曲线与实验结果吻合得很好。根据弹丸质量和靶板弹道极限，可以得出靶板临界穿透耗能 E_c，结果列于表 2。

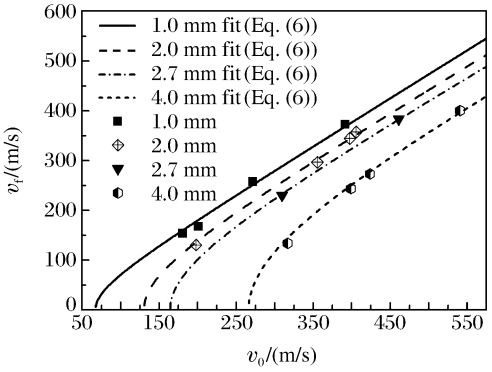


图 12 残余速度-入射速度曲线

Fig. 12 Residual velocity versus impact velocity

4 比较与讨论

靶板准静态压穿耗能 E_s 与动态临界穿透耗能 E_c 的比较如图 13 所示。可以看出，随着靶厚增加，穿透耗能增加，但 4 种厚度靶板的静态压穿耗能均大于动态临界穿透耗能，这是由于静态压入的整体变形大于动态穿透的整体变形，所以静态压穿时整体变形耗能较大。但是，在较高速度下，随着入射速度的增大，虽然靶板的整体变形变小，但是从表 2 中可以看出，靶板的穿透耗能大于临界穿透耗能，甚至超过了准静态压入耗能。这可以从 3 方面来解释：整体变形的应变率相关效应，局部变形、弯曲压痕的应变率相关效应，因 A3 钢对应变率效应敏感而导致的变形机制差异。

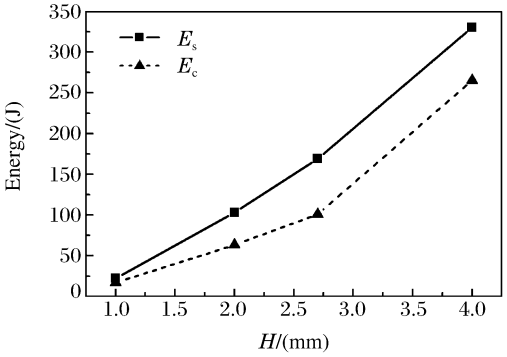


图 13 E_s 与 E_c 的比较

Fig. 13 Comprison of E_s and E_c

由实验可知，在靶厚和加载条件不同时，90°锥头弹丸在穿透薄钢板时，破坏模式是不一样的。准静态的破坏模式伴随着较大的整体变形，对于 1.0 mm 厚钢板，材料的延展性导致了沿轧制方向开裂破坏，2.0 和 2.7 mm 厚钢板的破坏模式为拉伸、弯曲和剪切联合作用的复合型破坏，4.0 mm 厚钢板为剪切型破坏。动态低速穿透破坏伴有整体变形，1.0 mm 厚钢板为花瓣型破坏，2.0、2.7 和 4.0 mm 厚钢板为冲塞型破坏。随着撞击速度和靶厚的变化，破坏模式的转化条件还有待进一步研究。

5 结 论

对 90°锥头弹丸穿透薄钢板进行了研究，由准静态实验得到了载荷-压入位移曲线，结合理论模型对实验结果进行了分析，得出：对于薄靶，大变形膜力起主导作用，但随着靶厚增加，弯距在板整体变形过程中的影响逐渐变大，较厚板的理论极限载荷比实验得到的极限载荷小。由动态穿透实验，得到了弹丸穿透 4 种不同厚度钢板的入射速度和残余速度，计算得出了临界穿透耗能。通过对准静态和动态穿透耗能和破坏模式进行比较，得出：准静态压穿耗能大于动态临界穿透耗能；在较高速度条件下，随着入射速度的增加，动态穿透耗能将增大；加载条件和靶板厚度不同时，90°锥头弹丸穿透靶板所产生的破坏模式会发生转化。

References:

[1] Backman M E, Goldsmith W. The mechanics of penetration of projectiles into targets [J]. Int J Eng Sci, 1978, 16(1): 1-99.

[2] Corbett G G, Reid S R, Johnson W. Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: A review [J]. Int J Impact Eng, 1996, 18(2): 141-230.

[3] Chen X W. Advances in the penetration/perforation of rigid projectiles [J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(3): 316-351. (in Chinese)
陈小伟. 穿甲/侵彻问题的若干工程研究进展 [J]. 力学进展, 2009, 39(3): 316-351.

[4] Corbett G G, Reid S R. Quasi-static and dynamic local loading of monolithic simply-supported steel plate [J]. Int J Impact Eng, 1993, 13(3): 423-441.

[5] Wen H M, Rao W F. Deformation and perforation of simply-supported circular plates struck normally by flat-faced projectiles [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(1): 51-58. (in Chinese)
文鹤鸣, 饶伟锋. 简支圆板在平头弹丸撞击下的变形与穿透 [J]. 高压物理学报, 2005, 19(1): 51-58.

[6] Børvik T, Clausen A H, Hopperstad O S, et al. Perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose steel projectiles—Experimental study [J]. Int J Impact Eng, 2004, 30(4): 367-384.

[7] Jones N. Structural impact [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.

[8] Recht R F, Ipson T W. Ballistic perforation dynamics [J]. J Appl Mech, 1963, 30(3): 384-390.

An Experimental Study of Thin Steel Plates Perforated by Conical-Nosed Projectiles

SUN Wei-Hai[1], JU Gui-Ling[2], CHEN De-Min[1], YANG Ban-Quan[1]

(1. *Department of Mechanical Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing* 100072, *China*;
2. *Department of Fundamental Courses, Academy of Armored Force Engineering, Beijing* 100072, *China*)

Abstract: Both quasi-static and impact loading experiments of thin steel plates are performed using conical-nosed projectiles with cone angle of 90°. Load-deflection curves and different failure modes are acquired from the quasi-static tests. Membrane analysis and plastic collapse model with pure bending are investigated and compared with the experimental data. It is shown that the membrane force dominates the deformation process for the large deformation of thin plate; with increase of the thickness of plate, the bending moment becomes more and more important. In the impact experiments, the initial and residual velocities with different failure modes are obtained for four plates with different thicknesses, and the critical perforation energies are evaluated. In addition, the experimental data of quasi-static and dynamic tests are compared and discussed.

Key words: conical-nosed projectile; thin steel plate; indentation; perforation; perforation energy