

破片模拟弹侵彻船用钢靶板的计算模型

高照, 侯海量, 李永清

(海军工程大学舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 为研究破片模拟弹侵彻钢板的过程, 将模拟弹冲击钢装甲的侵彻过程分为初始接触、弹体侵入、剪切冲塞和穿甲破坏4个阶段进行理论分析。当靶板剩余厚度的剪切冲塞抗力小于延性扩孔抗力时, 靶板的破坏模式完全转变为剪切冲塞; 剪切塞块速度与剩余弹体速度相同时, 推导出破片模拟弹侵彻钢靶板的能量转化及剩余速度公式, 与实验及有限元分析结果吻合较好。研究结果对于破片侵彻钢靶板威力设计具有一定实用价值。

关键词: 侵彻; 破片模拟弹; 冲击; 剩余速度

中图分类号: O344.7

文献标识码: A

弹靶撞击下金属装甲的侵彻破坏模式已有广泛研究^[1-3], 常见的破坏模式有延性扩孔、花瓣型、冲塞型、碟型等, 同时建立了许多分析模型和经验公式^[4], 如: Taylor^[5]基于能量分析方法得到的锥头弹冲击较厚薄板 ($h_0/d_p > 1$, h_0 、 d_p 分别为靶板初始厚度及弹径) 对称延性扩孔分析模型, Thomson^[6]提出的靶板厚度小于弹径时薄板常出现的非对称延性扩孔破坏 (碟型破坏模式) 的塑性变形功, Awerbuch 和 Bondner 提出的 A-B 模型^[7], 基于剪切冲塞破坏的德·马尔经验公式^[5]等。此外, Woodward^[8]考虑到弯曲变形, 以及当靶板厚度大于 0.9 倍弹径时存在对称延性扩孔模式等因素的影响, 对 Thomson 理论进行了修正; 他还利用 Taylor 延性扩孔方程研究了破坏模式由延性扩孔到绝热剪切的变化^[9]。

这些分析模型和经验公式大多针对板厚大于弹径的薄板或中厚靶, 对于板厚小于弹径的薄板冲击分析模型则主要针对受低速尖头弹冲击时的花瓣开裂穿甲^[10]。有实验^[11]表明, 破片模拟弹弹道冲击下, 薄金属靶板破口正面为延性扩孔破坏, 背面则为剪切冲塞破坏, 与通常的剪切冲塞和延性扩孔破坏不同, 且破片模拟弹同时具有尖头弹和平头弹的侵彻特性。本研究着重探讨薄金属靶板在侵彻下的能量转化及剩余速度, 并将分析结果与实验测试结果进行比较。

1 基本假设

通过分析破片模拟弹的侵彻过程, 将破片模拟弹冲击钢装甲的侵彻过程分为4个阶段: 初始接触阶段、弹体侵入阶段、剪切冲塞阶段和穿甲破坏阶段。同时, 对侵彻过程作如下假设:

(1) 高速破片形成之前, 大多都经历了变形硬化阶段, 在此忽略弹体的墩粗和弹性变形能, 假设弹体为理想刚塑性材料;

(2) 假设弹体的初始速度足以侵彻靶板以及使自身产生侵蚀, 侵彻过程中弹靶作用界面的速度呈线性变化;

(3) (根据 Dikshit 等^[12]对薄板与厚板塑性流动约束条件的假设) 假设靶板背面反射的拉伸波与弹靶作用界面相遇前, 侵彻条件为平面应变侵彻, 相遇后, 侵彻条件为平面应力侵彻;

* 收稿日期: 2018-08-09; 修回日期: 2018-08-23

基金项目: 国家自然科学基金 (51479204, 51679246)

作者简介: 高照 (1993—), 女, 硕士, 主要从事船舶结构力学研究. E-mail: gaozhao8686@163.com

通信作者: 侯海量 (1977—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事船舶结构力学研究.

E-mail: houl9611104@163.com

(4) 假设当靶板剩余厚度的剪切冲塞抗力小于延性扩孔抗力时, 靶板的破坏模式完全转变为剪切冲塞;

(5) 假设剪切塞块与剩余弹体速度相同, 忽略剪切冲塞过程中以及剪切塞块形成后, 弹体对塞块的侵彻及弹体的侵蚀。

2 分析模型

2.1 初始接触阶段

在初始接触阶段中, 弹体的侵彻不受靶板背表面的影响, 相当于对半无限靶的侵彻。采用 Tate-Alekseevskii^[13-14] 方程描述弹体的响应

$$Y_p + \frac{1}{2}\rho_p(v-u)^2 = R_t + \frac{1}{2}\rho_t(u-w)^2 \quad (1)$$

式中: Y_p 为弹体材料的动态屈服强度, ρ_p 、 ρ_t 分别为弹体和靶板的密度, v 为弹速, u 为侵彻速度, w 为靶板背面速度, R_t 为靶板的侵彻阻力。

弹靶初始碰撞时刻, 靶板背面速度 $w_0=0$, 弹靶作用界面速度

$$u_0 = \frac{1}{1-\mu^2} \left(v_0 - \mu \sqrt{v_0^2 + \Lambda} \right) \quad (2)$$

式中: $\Lambda = 2(R_t - Y_p)(1-\mu^2)/\rho_t$, $\mu = \sqrt{\rho_t/\rho_p}$; v_0 为初始弹速。

平面应变侵彻条件下, 取靶板侵彻阻力 R_t 为靶板材料在一维应变压缩条件下轴向应力的初始屈服极限 (即 Hugoniot 弹性极限)

$$R_t = \frac{1-\nu}{1-2\nu} Y_t \quad (3)$$

式中: ν 和 Y_t 分别为靶板材料的泊松比和动态屈服强度。由于弹靶初始碰撞时刻, 材料应变率约为 $10^3 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$, 当弹、靶材料相同时, 即 $Y_t=Y_p$, 取值为 $(1.75 \sim 1.85)\sigma_s$ (σ_s 是材料的静态屈服强度), 可得弹靶作用界面的初始速度 u_0

$$u_0 = \frac{1}{2}v_0 - \frac{\nu Y_p}{\rho v_0(1-2\nu)} \quad (4)$$

2.2 弹体侵入阶段

初始接触阶段过后, 在弹体和靶板中均产生一个压缩应力波, 同时弹靶作用界面继续向前运动。压缩应力波传播到靶板背面时, 反射形成拉伸应力波, 靶板背面开始运动, 弹体侵彻过程开始受到靶板背表面的影响。根据靶板背表面对侵彻过程的影响, 又可将弹体侵入阶段分为平面应变侵彻阶段和平面应力侵彻阶段。

2.2.1 平面应变侵彻阶段

靶板背表面开始运动前 ($t \leq t_1 = h_0/C_L$, C_L 为一维应变弹性纵波波速), 弹体的侵彻不受靶板背表面的影响。由于弹体减速是由弹靶作用界面作用于弹体上、沿长度方向的力引起的 (弹体能够承受的最大压力为 Y_p), 因此, t 时刻弹体长度由初始长度 l_0 变为 l 时, 弹体加速度为

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{M_p} A_p Y_p \quad (5)$$

式中: ρ , A_p 为弹体的横截面积。弹体被侵蚀的速度为

$$\frac{dl}{dt} = -(v - u_0) \quad (6)$$

根据 (5) 式、(6) 式迭代求解, 可得 $t=t_1$ 时弹体的侵蚀长度 Δl_1 和剩余速度 v_{t1} 。

2.2.2 平面应力侵彻阶段

随着弹体侵入深度的增加, 当靶板的侵彻阻抗大于靶板剩余厚度剪切冲塞抗力时, 靶板产生剪切冲塞破坏。对于圆柱形弹体, 靶板的剪切冲塞临界剩余厚度 h_{cr} 为

$$h_{cr} = \frac{A_p R_t}{\pi d_p \tau_t} = \frac{\sqrt{3}}{4} d_p \quad (7)$$

式中: τ_t 为靶板材料的动态剪切强度。

因此, 当平面应变侵彻阶段后靶板的剩余厚度小于 h_{cr} 时, 则不存在平面应力侵彻阶段, 而直接进入剪切冲塞阶段, 剪切塞块厚度

$$h_{plug} = h_0 - P_{s1} \quad (8)$$

$$P_{s1} = t_1 u_0 \quad (9)$$

式中: P_{s1} 为平面应变侵彻过程中靶板实际侵蚀厚度。

当平面应变侵彻阶段后靶板的剩余厚度大于 h_{cr} 时, 随着靶板背面开始运动, 弹体侵彻开始受到靶板背表面的影响, 进入平面应力侵彻阶段。该阶段初期, 靶板背面反射拉伸波与弹靶作用界面相遇前, u 恒等于 u_0 , 之后随靶板背面运动速度的增大呈线性增加。不考虑由于应力波的传播引起的速度波动, 靶板背面速度 w 在这一阶段初始时刻突然跃升, 随后近似线性增大, 根据一维应力波理论, 压缩波到达靶板背面时刻, 靶板质点速度为 u_0 , 有限元分析结果表明, 由于周围靶板材料的约束作用, w 的跃升值小于 u_0 , 且随靶板厚度的增加而减小; 初始压缩应力波传播到弹体尾端后, 弹体尾端速度 v 开始减小, 不考虑由于应力波的传播引起的质点速度波动, v 近似线性减小。因此, 可认为平面应力侵彻阶段靶板的侵彻速度及弹体的侵蚀速度均呈线性变化。

弹体尾端加速度及侵蚀速度分别为

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{M_p} A_p Y_p, \quad \frac{dl}{dt} = -(v - u) \quad (10)$$

靶板背面加速度及侵彻速度分别为

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{M_t} A_t R_t, \quad \frac{dh}{dt} = -(u - w) \quad (11)$$

式中: $M_t = \rho_t A_t h$, h 为靶板当前厚度。根据 (10) 式、(11) 式迭代求解, 可得当靶板剩余厚度 $h_r = h_{cr}$ 时弹体的侵蚀长度 Δl_2 和剩余速度 v_{r2} , 以及弹体侵蚀及靶板侵彻塑性变形功。

2.3 剪切冲塞阶段

当靶板剩余厚度 $h_r \leq h_{cr}$ 时, 弹体侵彻进入剪切冲塞阶段。为使剩余弹体与即将形成塞块的靶板材料获得相同速度而损失的动能为

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} M_{pr} v_{r2}^2 - \frac{M_{pr}^2 v_{r2}^2}{2(M_{pr} + m_{plug})} \quad (12)$$

$$M_{pr} = \rho_p A_p (l_0 - \Delta l_1 - \Delta l_2) \quad (13)$$

式中: M_{pr} 为剩余弹体的质量, m_{plug} 为塞块的质量。

与弹体接触部分的靶板材料相对其他部分产生剪切滑移运动, 假设剪切滑移等于靶板剩余厚度时, 剪切冲塞过程完成。弹体的动能损失等于剪切塑性功

$$W_{plug} = \int_0^{h_r} 2\pi r_p h \tau_p dx = \pi r_p h_r^2 \tau_t \quad (14)$$

2.4 穿甲破坏阶段

剪切塞块形成后, 靶板即发生穿甲破坏, 剩余弹体和靶板剪切塞块的动能等于弹体初始动能与侵彻过程中总塑性变形功之差

$$\frac{1}{2} (M_{pr} + M_{plug}) v_r^2 = \frac{1}{2} M_{pr} v_{r2}^2 - (\Delta E_k + W_{plug}) \quad (15)$$

3 实验验证

文献 [11] 对破片模拟弹侵彻钢板进行了实验及仿真研究, 采用火药推进 14.8 mm 口径滑膛弹道枪

发射系统为发射装置,为验证本公式的准确性,对文献中的工况进行计算。破片模拟弹的几何尺寸如图1所示,弹体直径 $D=14.9\text{ mm}$,高度 $c=20.449\text{ mm}$,弹体质量 26 g ,材料为945钢;靶板采用 $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 的945钢均质靶板,材料的主要性能如表1所示。

靶板厚度 h 、弹体入射速度 v_0 、出靶速度 v_r 、主要实验及仿真结果见表2。实验结果表明,靶板厚度越大,靶板正面花瓣变形越大,剪切变形越小。在破片模拟弹冲击的初始阶段,钢板破口的正面变形模式既有剪切破坏,又有延性扩孔破坏;随着弹体侵入深度的增大,弹头侵蚀程度变大,钢板产生剪切冲塞破坏。运用第2节的公式计算板厚 h 分别为4、6、8 mm 时不同弹体入射速度下的弹体剩余速度(弹体材料的动态屈服强度 $Y_p=954\text{ MPa}$),所得理论值也列于表2,其中: ε_{r1} 是理论计算值与实验值的相对偏差, ε_{r2} 是理论值与模拟值的相对偏差。

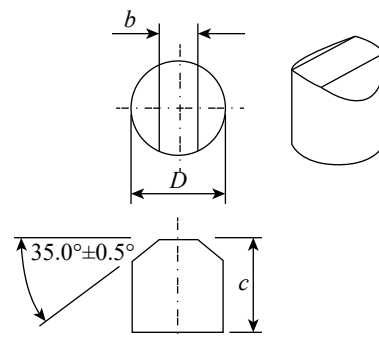


图1 弹体尺寸

Fig. 1 Projectile parameter

表1 945钢的材料参数

Table 1 Material parameters of steel 945

E/GPa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	ν	σ_s/MPa	σ_b/MPa	$\delta_s/\%$
205	7 770	0.32	≥ 440	550–685	≥ 20

表2 理论值与实验值及有限元模拟值结果对比

Table 2 Comparison of theoretical values with experimental values and finite element simulation results

Material	$\rho_{a0}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$E_d/(\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1})$
Material	$\rho_{a0}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$E_d/(\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1})$
0.25	0.26	0.27		0.28		0.29		0.30	0.31
0.25	0.26	0.27		0.28		0.29		0.30	0.31
0.25	0.26	0.27		0.28		0.29		0.30	0.31
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
99	99	99							

由表2可知,破片模拟弹侵彻过程中弹靶作用界面的速度与侵彻速度近似呈线性关系。靶板厚度越小,剩余速度的实验值与计算值越接近;靶板厚度越大,其偏差也越大。这是由于弹道试验具有一定离散性,且与实验存在的误差、材料动态参数取值以及弹丸侵彻姿态等因素有关。靶板厚度较大时,靶板侵彻初期与薄板相似,但在弹体侵入阶段,靶板塑性流动的约束条件由一维应变压缩条件逐渐转变为一维应力压缩条件,使侵彻规律变得复杂。同时随着靶板厚度的增加,弹体侵彻靶板时,靶板的破坏模式会发生变化,其吸能方式也发生改变。在实验中,弹体侵彻靶板产生剪切塞块,塞块的速度略大于破片的剩余速度,由于计算中塞块的动能偏小,导致破片剩余速度的计算值偏大。随着靶板厚度的增加,塞块质量增大,计算误差也相应增大。

4 结 论

建立了破片高速侵彻金属薄板过程的理论分析模型,将侵彻过程分成初始接触、弹体侵入、剪切冲塞、穿甲破坏4个阶段,推导出破片高速侵彻薄板的剩余速度及能量转化公式,并与实验、有限元仿真结果进行了对比。计算过程中所涉及的实测参数较少,可近似计算破片模拟弹侵彻钢装甲下的剩余速度及能量,对钢装甲的设计具有一定实用价值。但是由于实验数据具有局限性,且假设剪切塞块速度与剩余弹体速度相同等因素,随着靶板厚度的增加,公式计算值还需要进一步修正。

参考文献:

- [1] 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.
HOU H L, ZHU X, LI W, et al. Numerical analysis of perforation mechanism for a thin plate subjected to impact by hemispherical-nosed projectiles with low velocity [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(1): 40–45.
- [2] DEAN J, DUNLEAVY C S, BROWN P M, et al. Energy absorption during projectile perforation of thin steel plates and the kinetic energy of ejected fragments [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(10): 1250–1258.
- [3] 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 H L, ZHU X, LI W, et al. Dynamic plastic response of thin plate subjected to impact of spherical-nosed projectiles with low velocity [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2010, 22(5): 56–61.
- [4] 熊冉, 高欣宝, 许兴春, 等. 破片侵彻金属薄板后的剩余速度研究 [J]. *爆破*, 2013, 30(4): 41–44.
XIONG R, GAO X B, XU X C, et al. Research on residual velocity of fragment after penetrating metallic sheet [J]. *Blasting*, 2013, 30(4): 41–44.
- [5] TAYLOR G I. The formation and enlargement of circular hole in a thin plastic sheet [J]. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 1948, 1(1): 103–124.
- [6] THOMSON W T. An approximate theory of armor penetration [J]. *Journal of Applied Physics*, 1955, 26(1): 80–82.
- [7] 赵国志. 穿甲工程力学 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992: 52–57.
ZHAO G Z. Engineering mechanics on armor piercing [M]. Beijing: Armament Industry Press, 1992: 52–57.
- [8] WOODWARD R L. The penetration of metal targets which fail by adiabatic shear plugging [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1978, 20(9): 599–607.
- [9] 侯海量, 朱锡, 梅志远, 等. 高速破片对半无限厚钢靶的侵彻试验研究 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2006, 29(1): 39–42.
HOU H L, ZHU X, MEI Z Y, et al. Experimental study on penetration of semi-infinite steel targets under the impact of high speed fragments [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2006, 29(1): 39–42.
- [10] 侯海量, 朱锡, 谷美邦, 等. 破片模拟弹侵彻钢板的有限元分析 [J]. *海军工程大学学报*, 2006, 18(3): 78–83.
HOU H L, ZHU X, GU M B, et al. Investigation on penetration of steel plate by fragment simulated projectile using finite element method [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2006, 18(3): 78–83.
- [11] 蒋志刚, 曾首义, 周建平. 刚性尖头弹侵彻贯穿金属薄靶板耗能分析 [J]. *兵工学报*, 2004, 25(6): 777–781.
JIANG Z G, ZENG S Y, ZHOU J P. An analytical model for penetration into finite thickness metallic target struck by rigid sharp-nosed projectiles [J]. *Acta Armamentarii*, 2004, 25(6): 777–781.
- [12] DIKSHIT S N, KUTUMBARAO V V, SUNDARARAJAN G. The influence of plate hardness on the ballistic penetration of thick steel plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, 16(2): 293–320.
- [13] TATE A. A theory for the deceleration of long rods after impact [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1967, 15(6): 287–399.
- [14] TATE A. Further results in the theory of long rods penetration [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1969, 17(3): 141–150.

Numerical Calculation on Penetration of Ship Steel Plate by Fragment Simulated Projectile

GAO Zhao, HOU Hailiang, LI Yongqing

(College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: To investigate the penetration of steel plates by fragment simulated projectiles (FSP), we carried out a theoretical analysis of the steel plate's penetration process, dividing it into 4 stages, sequentially of initial contact, penetration, plugging and perforation and successfully obtaining the formula that calculate the penetration remaining velocity and energy transformation. The calculation result is in good agreement with the results from experiment and finite element observation. The formula is applicable to practical steel plate design.

Keywords: penetration; fragment simulated projectiles; shock; remaining velocity