

文章编号: 1001-1455(2010)04-0395-06

# 舰船舷侧防护液舱舱壁对爆炸破片的防御作用\*

徐双喜<sup>1</sup>, 吴卫国<sup>1,2</sup>, 李晓彬<sup>1</sup>, 孔祥韶<sup>1</sup>, 黄燕玲<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学交通学院, 湖北 武汉 430063;

2. 武汉理工大学高速船舶工程教育部重点实验室, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 针对破片撞击液舱外板, 建立分析模型探讨背水靶板的穿甲过程。以能量分析为基础, 根据破片穿甲的运动方程和德·玛尔模型, 推导破片穿透背水靶板后的剩余速度公式。根据给出的剩余速度公式, 计算不同初始速度(1.0~1.6 km/s)的破片穿透背水靶板后的剩余速度, 根据已有剩余速度公式计算破片以同样的初始速度穿透背水靶板后的剩余速度, 并用非线性动力学分析软件 AUTODYN 对相应的破片穿甲过程进行数值模拟。模拟结果能较好地与理论计算结果相吻合。与破片穿透背水靶板的情况相比, 破片穿透背水靶板后剩余速度降低更明显。破片初始速度越高, 板后的液体对破片阻碍作用越明显, 破片速度降越大。

**关键词:** 固体力学; 穿甲过程; 剩余速度; 防护液舱; 破片

**中图分类号:** O347

**国标学科代码:** 130·15

**文献标志码:** A

反舰武器战斗部的高速预制破片及爆炸产生的小质量不规则二次破片对舰船结构的毁伤效应极为显著, 已有一系列针对破片的穿甲效应的理论和实验研究。朱锡等<sup>[1]</sup>对舰用复合装甲的高速破片侵彻作用进行了实验研究, 模拟全预制破片杀伤战斗部爆炸所产生的破片对舰体的侵彻作用。虞德水等<sup>[2]</sup>采用 1:1 半穿甲反舰战斗部, 进行 1:1 模拟舰船的爆炸毁伤效应实验, 发现爆炸二次破片穿透 4 层 6 mm 厚的 Q235-A 靶板。M. Zaid 等<sup>[3]</sup>、B. Landkof 等<sup>[4]</sup>和 M. Ravid 等<sup>[5]</sup>通过建立模型分析穿甲过程中的动量和能量, 在刚性假设基础上探讨弹体在穿透靶板过程中的侵彻机理, 得到了穿透靶板的弹道极限和剩余速度。

如图 1 所示, 现役大型水面舰船舷侧多层防护结构中均设有液舱, 主要作用之一是使武器战斗部爆炸破片和外板破裂的二次破片在高速穿入液舱后速度迅速衰减, 因而称为吸收舱。本文中, 主要针对破片撞击液舱外板, 建立分析模型探讨背水靶板的穿甲过程, 与空背靶板的穿甲过程进行比较分析, 并研究液舱中液体对破片穿甲的影响。

## 1 理论分析模型

由于舰船板架厚度较薄, 高速破片穿透液舱外板的过程与普通的薄板穿甲过程一样, 分为 3 个阶段<sup>[6]</sup>: (1) 第 1 阶段(如图 2(a)所示)。破片与靶板高速撞击, 靶板表面出现凹坑, 弹体在轴向发生塑性变形, 无质量损耗, 靶板表面凹陷厚度随侵入体塑性流动。靶板后面液舱中液体未出现扰动, 该阶段主要考虑破片对靶板轴向挤压和扩孔引起的塑性变形。

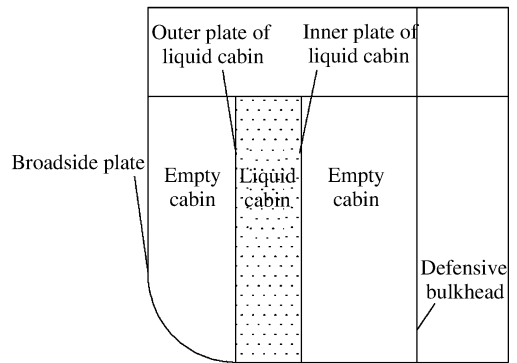


图 1 舰船舷侧防护结构示意图  
Fig. 1 Sketch map of warship broadside protective structure

\* 收稿日期: 2009-04-28; 修回日期: 2009-08-30  
基金项目: 国防基础研究项目(A1420080184)  
作者简介: 徐双喜(1983—), 男, 博士研究生。

(2)第2阶段(如图2(b)所示)。破片变形之后进一步侵入靶板,出现冲塞块,破坏模式转变为剪切冲塞破坏,破片与冲塞块具有共同速度。由于冲塞块的形成扰动靶板后液体,破片与冲塞块的运动产生一部分附加液体质量。(3)第3阶段(如图2(c)所示)。由破片与靶板冲塞块运动引起的液体扰动随时间向液舱纵深发展,附加的液体质量也随时间增加,直到破片完全穿过靶板,此后变形的破片在液舱中继续运动,主要受到摩擦阻力和压差阻力作用。

在能量分析过程中假设:(1)破片在穿透靶板过程中的能量损失包括弹靶的挤压塑性变形能和冲塞剪切变形能、扰动板后液体运动、破片与冲塞块动能;(2)破片穿过靶板时质量不变,在冲塞块形成之前靶板被侵入厚度质量随破片侵入塑性流动而完全侵蚀;(3)液舱中液体为无粘性理想流体,不考虑剪切强度;(4) $t$ 时刻破片和冲塞块引起的扰动液体厚度为 $c_0 t$ , $c_0$ 为液体中的声速;(5)被扰动液体与冲塞块和剩余破片有共同速度。

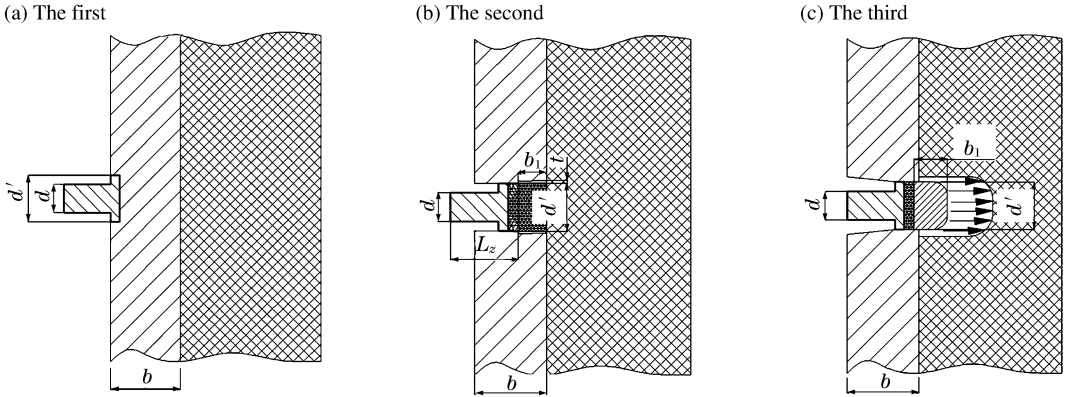


图2 破片穿透背水靶板过程示意图

Fig. 2 Sketch map of water-backed target penetrated by fragment

## 2 能量损耗过程及剩余速度公式

由理论分析模型及假设条件,破片的质量为 $m_p$ ,穿甲过程中形成冲塞块的质量为 $m_f$ ,冲塞块及剩余破片的共同速度为 $v_r$ ,扰动液体的质量为 $m_s = \rho_s c_0 t$ 。

根据能量守恒原理

$$E = E_r + E_c \quad (1)$$

$$E_r = \frac{1}{2}(m_p + m_f + m_s)v_r^2 \quad (2)$$

$$E_c = E_p + E_s \quad (3)$$

式中: $E$ 为破片的初始动能, $E_r$ 为剩余动能(剩余破片、冲塞块和扰动液体), $E_c$ 为穿透能, $E_p$ 为破片和靶板的塑性变形能, $E_s$ 为靶板剪切塑性变形能。

### 2.1 破片与靶板的塑性变形能

第1阶段主要以靶板和破片的塑性变形能为主,破片所撞击的靶板材料受到破坏压缩应力 $\sigma_{ct}$ ,靶板材料一部分从弹体的运动中获得动量。运动方程为<sup>[7]</sup>

$$F_1(t) = -\frac{1}{2}c_1\rho_t A_p v^2 - \sigma_{ct} A_p = \rho_t A_p v^2 + (m_p + \rho_t A_p x)v \frac{dv}{dx} \quad (4)$$

式中: $A_p$ 为破片截面积; $c_1$ 是与破片形状有关的一个常数,对于柱形破片 $c_1 = 1$ 。

考虑应变率的影响,采用Johnson-Cook本构模型<sup>[8]</sup>。则靶板材料受到的破坏压缩应力为

$$\sigma_{ct} = (A + B(\epsilon^p)^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - (T^*)^m) \quad (5)$$

式中: $A$ 、 $B$ 、 $n$ 、 $C$ 和 $m$ 为材料参数; $\epsilon^p$ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^*$ 为量纲一应变率, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}^p / \dot{\epsilon}_0$ ;  $\dot{\epsilon}_0$ 为参考塑性应变率,通常取 $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ ;  $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ , $T^*$ 为量纲一温度, $T_r$ 为参考室温(293 K), $T_m$ 为熔

化温度(1 775 K)。

根据初始条件,可得到速度

$$v_1^2 = \left( v_0^2 + \frac{2\sigma_{ct}}{3\rho_t} \right) \left( \frac{m_p}{m_p + \rho_t A_p x} \right)^3 - \frac{2\sigma_{ct}}{3\rho_t} \quad (6)$$

式中: $x$ 为破片侵入靶板距离,即靶板塑性凹坑的深度。

开坑阶段弹体侵入体积为<sup>[6]</sup>

$$V_{bt} = \frac{1}{4} \pi C_d^2 d^2 (1 - C_s) b \quad (7)$$

式中: $C_d = d'/d$ 为破片轴向压缩率; $C_s$ 为冲塞块与原靶板的厚度比。在一定弹道冲击条件下 $C_d$ 为确定系数。

根据假设条件塑性凹坑的深度为

$$h_p = \frac{4V_{bt}}{\pi(d')^2} \quad (8)$$

则变形后的破片穿透靶板剩余厚度为

$$h_r = b - h_p \quad (9)$$

第1阶段损耗的破片和靶板塑性变形能为

$$E_p = \frac{1}{2} m_p v_0^2 - \frac{1}{2} m_p v_1^2 = \frac{1}{2} m_p v_0^2 - \frac{1}{2} m_p \left( v_0^2 + \frac{2\sigma_{ct}}{3\rho_t} \right) \left( \frac{m_p}{m_p + \rho_t A_p h_p} \right)^3 + \frac{m_p \sigma_{ct}}{3\rho_t} \quad (10)$$

## 2.2 靶板的剪切塑性变形及扰动板后液体过程

第2阶段,形成冲塞块的过程中假设墩粗后(塑性变形结束)的破片为刚性破片,靶板厚度为原来厚度的基础上减去塑性凹坑深度。

在德·玛尔分析模型的基础上<sup>[6-7]</sup>,可得到靶板材料的剪切塑性变形能为

$$E_s = K_s (d')^{1.5} h_r^{1.5} \quad (11)$$

式中: $K_s = K'_s k_1 k_2 f_{Hs} \pi \sigma_{st}$ 。将 $C_d = d'/d$ 和式(9)代入得到

$$E_s = K_s C_d^{1.5} d^{1.5} (b - h_p)^{1.5} \quad (12)$$

式中: $K'_s$ 是与材料的硬化性能、动态效应等因素有关的能量系数; $f_{Hs}$ 为弹头形状系数,经历第1阶段的塑性变形后,破片近似为圆头弹, $f_{Hs} = 0.5$ ; $K_s = 1.922 \times 10^9$ ,为穿甲复合系数。

由能量守恒原理,第1阶段结束时破片的动能一部分转变为靶板的剪切塑性变形能,另一部分转变为破片、冲塞块的动能。即

$$\frac{1}{2} m_p v_1^2 = E_s + \frac{1}{2} (m_p + m_f) v_2^2 \quad (13)$$

根据假设,冲塞块的质量为

$$m_f = \frac{1}{4} \rho_t \pi (d')^2 h_r = \frac{1}{4} C_d^2 C_s \rho_t \pi d^2 b \quad (14)$$

冲塞块形成之后,扰动靶板后液体运动,所经历的时间可近似为

$$t_2 = \frac{b - h_p}{v_2} \quad (15)$$

则扰动液体的质量可表示为

$$m_s = \frac{1}{4} \pi (d')^2 \rho_s c_0 t_2 \quad (16)$$

由能量守恒原理

$$\frac{1}{2} (m_p + m_f) v_2^2 = \frac{1}{2} (m_p + m_f + m_s) v_r^2 \quad (17)$$

### 2.3 破片穿透背水靶板后的剩余速度

在以上分析模型和能量原理的基础上,可得到破片在穿透背水靶板后的剩余速度

$$v_r^2 = \frac{m_p \left[ \left( v_0^2 + \frac{2\sigma_{ct}}{3\rho_t} \right) \left( \frac{m_p}{m_p + \rho_t A_p \pi h_p / 4} \right)^3 - \frac{2\sigma_{ct}}{3\rho_t} \right] - 2E_s}{m_p + m_t + m_s} \quad (18)$$

由文献[6],破片弹径墩粗率经验表达式为

$$C_d = d'/d = 0.066b - 0.053d + 1.67 \quad (19)$$

冲塞厚度比与靶板厚度及弹径的关系为

$$C_s = h_1/b = -0.0087b + 0.017d + 0.46 \quad (20)$$

## 3 算例

靶板和破片材料均为45钢,靶板厚度  $b=10.5$  mm,破片直径  $d=11$  mm,长  $L=13.5$  mm,长细比  $L/d=1.23$ ,质量  $m_p=10$  g。

在模拟破片穿过程中需要考虑材料的应变率效应,材料的本构模型用 Johnson-Cook 模型<sup>[8]</sup>描述。45钢的材料参数分别为: $\rho=7.8$  t/m<sup>3</sup>,  $E=200$  GPa,  $\mu=0.3$ ,  $A=507$  MPa,  $B=320$  MPa,  $n=0.064$ ,  $c=0.28$ ,  $m=1.06$ 。

根据以上提出的高速破片穿透背水靶板后的剩余速度公式,计算破片不同速度(1.0~1.6 km/s)时的剩余速度,并用非线性动力学分析软件 AUTODYN 进行穿甲过程的数值模拟,破片和背水靶板的有限元模型如图3所示,采用 Autodyn 中的耦合算法模拟穿甲过程。

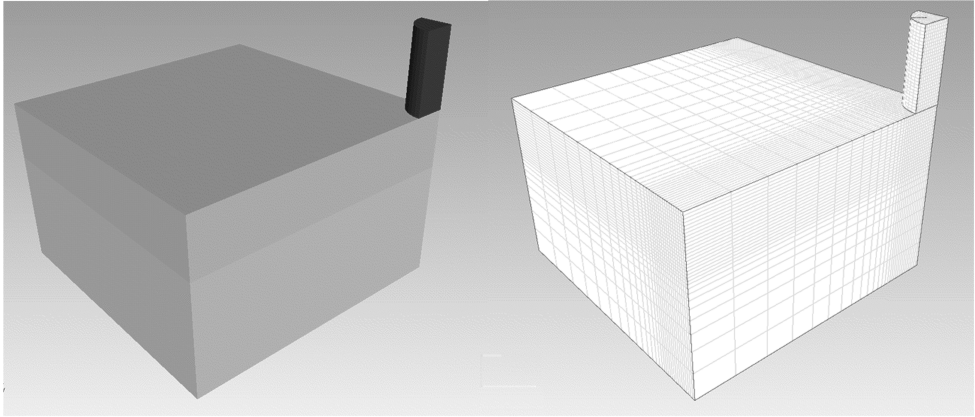


图3 破片和背水靶板 Autodyn 模型

Fig. 3 Autodyn simulation model of fragment and water-backed target

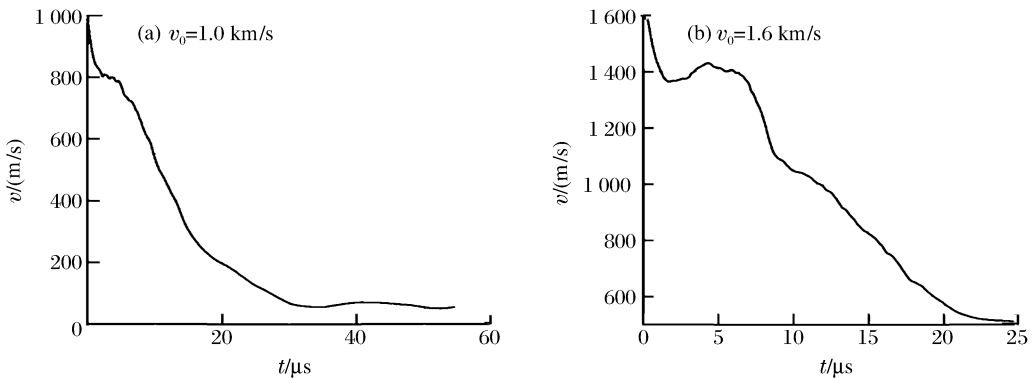


图4 破片穿透背水靶板的时间历程曲线

Fig. 4 Time histories of fragment penetrating water-backed target

图4为当破片初速为1.0和1.6 km/s时破片速度的时间历程曲线,剩余速度分别为53.3和510 m/s。

根据文献[6]的破片穿透靶板剩余速度的公式,计算破片以不同速度穿透靶板时的剩余速度,并对穿透过程进行数值模拟,得到剩余速度。应用本文提出的破片穿透背水靶板的剩余速度表达式,计算破片的剩余速度,并与数值模拟结果进行比较,结果如图5所示。

### 4 结论

以能量分析为基础,根据破片穿甲的运动方程和德·马尔模型,推导出柱形破片穿透背水靶板后的剩余速度公式。经过数值模拟并与背空靶板剩余速度的经验公式进行对比,结论如下:

(1)高速破片穿透靶板时,综合考虑穿透过程挤压塑性变形和环向剪切塑性变形发生的情况,将穿透过程分为2个阶段:第1阶段,主要考虑弹靶挤压塑性变形,根据运动方程和质量不变假设可得到破片侵入靶体开坑深度;第2阶段,将变形后的破片近似处理为刚体,主要是靶板发生环向剪切变形。从计算结果来分析,这种假设过程是合理的。

(2)破片在穿透背水靶板的过程中对板后的液体产生扰动,液体对破片的穿透有一定的阻力。与破片穿透空背靶板的情况相比较,剩余速度明显降低。破片速度越高,液体的阻碍作用越明显,速度降低越大。

文中主要研究破片穿透液舱外板后的剩余速度。关于背液板,板的开裂和水密性丧失等,需要进一步的工作。

### 参考文献:

[1] 朱锡,梅志远,徐顺棋,等. 高速破片侵彻舰用复合装甲模拟试验研究[J]. 兵工学报,2003,24(4):530-533.  
 ZHU Xi, MEI Zhi-yuan, XU Shun-qi, et al. Experiment research on the penetration of high-velocity fragments in composite warship armor[J]. Acta Armamentar, 2003,24(4):530-533.

[2] 虞德水,于川,张远平,等. 半穿甲战斗部对模拟舰船结构毁伤效应试验研究[C]//王彦平. 第四届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集. 2006:294-299.

[3] Zaid M, Paul B. Oblique perforation of a thin plate by a truncated conical projectile[J]. Journal of the Franklin Institute, 1959,26(8):22-24.

[4] Landkof B, Goldsmith W. Petalling of thin, metallic plates during penetration by cylindro-conical projection[J]. International Journal of Solids and Structures, 1985,21(3):245-246.

[5] Ravid M, Bonder S R, Holcman I. Penetration into thick targets-refinement of a 2D dynamic plasticity approach [J]. International Journal of Impact Engineering, 1994,15(4):491-499.

[6] 梅志远,朱锡,张立军. 高速破片穿透船用钢板剩余特性研究[J]. 工程力学,2005,22(4):235-240.  
 MEI Zhi-yuan, ZHU Xi, ZHANG Li-jun. The residual characteristic of high-velocity fragments after perforation of ship hull[J]. Engineering Mechanics, 2005,22(4):235-240.

[7] 钱伟长. 穿甲力学[M]. 北京:国防工业出版社,1984:322-323.

[8] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metal subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressure[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985,21(1):31-48.

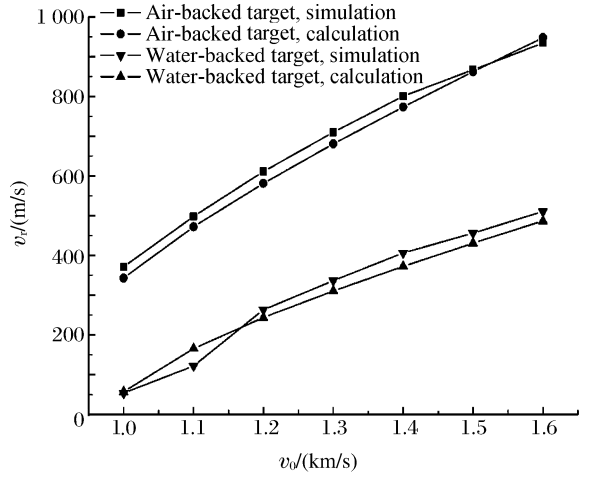


图5 破片穿透背空靶板与背水靶板的剩余速度

Fig. 5 Residual velocities of fragments penetrating air-backed and water-backed targets

## Protective effect of guarding fluid cabin bulkhead under attacking by explosion fragments<sup>\*</sup>

XU Shuang-xi<sup>1</sup>, WU Wei-guo<sup>1,2</sup>, LI Xiao-bin<sup>1</sup>,  
KONG Xiang-shao<sup>1</sup>, HUANG Yan-ling<sup>1</sup>

(1. *School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China;*

2. *Key Laboratory of High Speed Ship Engineering, Ministry of Education,*

*Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China)*

**Abstract:** Aimed at fragment penetration into fluid cabin bulkhead, a theoretical analysis model was established to explore the penetration process of water-backed targets. Based on the energy analysis, a formula for the residual velocity of the fragment after the water-backed target penetration was derived by combining the motion equation and the De Marre model. The derived formula was applied to calculate the residual velocities of the fragments with the initial velocities of 1.0~1.6 km/s. And the penetration process of the fragments into the water-backed target was modeled by using the non-linear dynamics analysis software, AUTODYN. The residual velocities by the derived formula are in agreement with those by the software, AUTODYN. The residual velocities obtained above were compared with those by the existent formula for the fragments with the same initial velocities after the air-backed target penetration. Comparison shows that the fluid behind the bulkhead can prevent fragment penetration to a certain extent, and that the residual velocity in the case of the air-backed target penetration is markedly lower than that in the case of the water-backed target penetration. The higher the initial velocity of the fragment, the greater the fluid resistance, the clearer the velocity attenuation.

**Key words:** solid mechanics; penetrate the target; residual velocity; guarding fluid cabin; fragments

---

\* Received 28 April 2009; Revised 30 August 2009

Corresponding author: XU Shuang-xi, griansmile@163.com