

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0075

截锥形弹体在液体介质中运动速度衰减规律分析*

孔祥韶^{1,2}, 石 干^{1,2}, 王旭阳^{1,2,3}, 周红昌^{1,2}, 吴卫国^{1,2}

(1. 武汉理工大学绿色智能江海直达船舶与邮轮游艇研究中心, 湖北 武汉 430063;

2. 武汉理工大学交通学院, 湖北 武汉 430063;

3. 西安航天动力研究所液体火箭发动机技术重点实验室, 陕西 西安 710100)

摘要: 水面舰船被动防护体系中液舱的主要功能之一是阻止高速弹体(爆炸破片)对内部重要结构、设备和人员的威胁, 高速弹体打击液舱的过程包含着复杂的能量传递与耗散。为了分析弹体形状对其在液体介质中运动速度衰减的影响, 开展了一系列不同头形因数的截锥形弹体在不同入水速度下弹体垂直侵彻液体介质过程的数值模拟, 得到了垂直侵彻液体介质时弹体速度衰减特性, 发现高速弹体在液体介质中运动的阻力因数与弹体形状和无量纲速度有关。基于对系列数值模拟计算结果的拟合分析, 提出了计及头形因数的截锥形弹体垂直侵彻液体介质时的速度衰减经验公式, 通过开展数值算例分析验证了公式计算结果的可靠性。本文中提出的经验公式可实现对高速弹体在液体介质中速度衰减的准确快速计算, 为舰船防护液舱结构设计提供一定的参考。

关键词: 截锥形弹体; 头形因数; 速度衰减; 防护液舱

中图分类号: O353.4

国标学科代码: 13025

文献标志码: A

On velocity attenuation of a truncated cone-shaped projectile vertically penetrating through liquid

KONG Xiangshao^{1,2}, SHI Gan^{1,2}, WANG Xuyang^{1,2,3}, ZHOU Hongchang^{1,2}, WU Weiguo^{1,2}

(1. *Green & Smart River-Sea-Going Ship, Cruise and Yacht Research Center, Wuhan University of Technology,*

Wuhan 430063, Hubei, China;

2. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China;

3. Science and Technology on Liquid Rocket Engine Laboratory, Xi'an Aerospace Propulsion Institute,

Xi'an 710100, Shaanxi, China)

Abstract: One of the main functions of liquid tanks in the passive protective systems of surface warships is to prevent the damage by high-velocity projectiles (explosive fragments) to important internal structures, equipments and personnels. The process of high-velocity projectile penetrating through a liquid tank involves complex energy transfer and dissipation. To explore the influences of the head shape of a projectile and its water-entry velocity on the velocity attenuation of the projectile in fluid, a series of truncated cone-shaped projectiles with different head shape factors were developed to numerically simulate the processes of the truncated cone-shaped projectiles vertically penetrating through the fluid at different initial water-entry velocities. The velocity attenuation characteristics were obtained for the projectiles vertically penetrating through the fluid. The above results display that the resistance factor of a high-velocity projectile moving in the fluid is related with the projectile shape and the ratio of the instantaneous velocity of the projectile to its initial water-entry velocity. Based on the numerical simulations and the corresponding fitting results, an empirical formula was proposed by considering the projectile head factor to predict the velocity attenuation of the truncated cone-shaped projectiles vertically penetrating through the fluid. And a series

* 收稿日期: 2020-03-20; 修回日期: 2020-06-24

基金项目: 装备预研教育部联合基金(青年人才)(6141A02033108)

第一作者: 孔祥韶(1983—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, kongxs@whut.edu.cn

of calculation examples were carried out to verify the formula. These calculation examples show that the formula is feasible and can be used to accurately calculate the velocity attenuation of high-velocity projectiles in fluid media and it is helpful for the structural design of the protective tanks of warships.

Keywords: truncated cone-shaped projectile; head shape factor; velocity attenuation; protective tank

大型水面舰艇通常采用液舱来防护反舰武器爆炸破片对内部结构和人员的威胁^[1]。弹体在侵彻液舱过程中与液体的作用机理十分复杂, 弹体在液体介质中的贯彻距离、速度衰减规律以及高速弹体引起的水锤效应, 是广大学者长期关注的问题, 对此已开展了大量的研究。Lee 等^[2]在经典冲击压力模型的基础上, 将弹体简化为点源, 对高速弹体在液体中引起的空腔效应展开了研究, 推导建立了空腔动力学方程。李营等^[3]在考虑长径比的影响下, 将阻力因数作为与初速度有关的常量来处理, 拟合得到了阻力因数计算经验公式。沈晓乐等^[4]考虑弹体的墩粗变形进行了实验研究, 对方形弹体入水的阻力因数进行了修正。郭子涛^[5]分析了弹头形状对弹体水弹道稳定性以及速度衰减规律的影响, 提出了一种简化的弹体头型阻力因数估算公式。Zhao 等^[6]在考虑雷诺数的基础上对球形弹入水阻力因数进行拟合, 提出了球形弹入水阻力因数经验公式。Zhang 等^[7]在 Lee 等^[2]研究工作的基础上针对长径比在 0.1~0.5 之间的饼形弹进行研究, 并对饼形弹入水阻力因数计算公式进行了修正。这些研究普遍简化了阻力因数的影响因素, 与实际物理过程有较大的区别。

本文中, 拟采用理论分析和数值模拟的方法, 针对以上存在的问题, 开展截锥形弹体垂直穿透液体介质时的速度衰减特性研究, 重点分析不同弹体头形因数对其速度衰减规律的影响, 以期建立阻力因数与弹体的瞬时速度之间的关系, 并引入弹体形状参数的影响, 建立截锥形弹体在液体中的速度衰减分析模型。

1 弹体侵彻液体介质速度衰减规律

当弹体在液体介质中高速运动时, 弹体损失的动能主要转化为液体的动能及空泡的压力势能, 而空泡的存在极大地减小了弹体与液体的接触面积, 从而弹体运动所受的摩擦阻力减小, 因此压差阻力是影响弹体阻力的主要因素。则根据牛顿第二定律建立弹体运动方程如下^[8]:

$$M \frac{dv_b}{d\tau} = -\frac{1}{2} \rho_w A_0 C_d v_b^2 \quad (1)$$

式中: M 为弹体质量, v_b 为弹体在 τ 时刻瞬时速度, ρ_w 为液体密度, A_0 为弹体在运动方向上的投影面积, C_d 为阻力因数。

对式(1)进行变换可得:

$$M \frac{dv_b}{dx_b} \frac{dx_b}{d\tau} = -\frac{1}{2} \rho_w A_0 C_d v_b^2 \quad (2)$$

$$\int_{v_b^{(i)}}^{v_b^{(i+1)}} M \frac{1}{v_b} dv_b = \int_{x_b^{(i)}}^{x_b^{(i+1)}} \left(-\frac{1}{2} \rho_w A_0 C_d \right) dx_b \quad (3)$$

可得阻力因数 C_d 与瞬时速度 v_b 的关系:

$$C_d = -\frac{2m}{\rho_w A_0 [x_b^{(i+1)} - x_b^{(i)}]} \ln \frac{v_b^{(i)}}{v_b^{(i+1)}} \quad (4)$$

式中: $v_b^{(i)}$ 为 i 时刻弹丸的瞬时速度, $v_b^{(i+1)}$ 为 $i+1$ 时刻弹丸的瞬时速度, $x_b^{(i)}$ 为 i 时刻弹丸的瞬时距离, $x_b^{(i+1)}$ 为 $i+1$ 时刻弹丸的瞬时距离。

目前对于阻力因数 C_d , 学者们提出了不同的取值方式。

沈晓乐等^[4]认为当弹体形状为立方体时 $C_d = 0.15$ 。

Garrett 等^[9]认为阻力因数与空化数 σ 满足如下关系:

$$C_d = C_0(1 + \sigma) \quad (5)$$

式中: C_0 的取值为 0.82~0.83。空化数:

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_c}{0.5\rho_w v_b^2} \quad (6)$$

式中: p_∞ 为水压力; p_c 为空泡压力, 一般取水的饱和蒸气压 (2.3 kPa)。

孔祥韶等^[10] 根据 Lecysyn 等^[11] 给出的有关雷诺数 Re 的计算公式:

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{3.73}{\sqrt{Re}} - \frac{4.83 \times 10^{-3} \sqrt{Re}}{1 + 3 \times 10^{-6} Re^{3/2}} + 0.49 \quad (7)$$

得出, 当弹体的运动速度在 200~2 000 m/s 之间时, C_d 取值在 0.490 8~0.491 7 之间, 并提出在简化计算时 C_d 可取定值 0.491。

Lee 等^[2] 对于球形弹体入水问题, 采用分段的阻力因数:

$$C_d = \begin{cases} 0.384 & 0 < Ma < 0.5 \\ 0.6396 + 0.5974(Ma - 1) - 0.1618(Ma - 1)^2 - 0.7212(Ma - 1)^3 & 0.5 \leq Ma \leq 1.4 \\ 0.7624 + 0.2398\left(\frac{1}{Ma} - \frac{1}{2.75}\right) - 0.475\left(\frac{1}{Ma} - \frac{1}{2.75}\right)^2 & 1.4 < Ma < 4 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $Ma = v_0/c_w$, v_0 为弹体入水初速度, c_w 为水中声速。

Zhao 等^[6] 在考虑雷诺数的基础上对球形弹入水阻力因数进行拟合:

$$C_d = \begin{cases} 0.4 & 0 < Ma < 0.5 \\ -0.23122 + 1.55868Ma - 0.64417Ma^2 + 0.08474Ma^3 & 0.5 \leq Ma \leq 3 \\ 0.936 & 3 < Ma \leq 4 \end{cases} \quad (9)$$

李营等^[3] 在 Lee 等^[2] 工作的基础上针对圆柱形平头弹开展了研究, 并考虑长径比参数的影响, 对阻力因数进行了修正。

Zhang 等^[7] 在 Lee 等^[2] 工作的基础上针对长径比在 0.1~0.5 之间的饼形弹, 考虑入水角度的变化, 提出了弹体侵入水介质过程中速度衰减的修正公式。

但是在以上的研究中, 都是将阻力因数 C_d 作为只与初始入水速度 v_0 有关的常量来处理, 弹体的受力面是按最大截面来考虑, 没有考虑到弹体头部形状的差异, 与实际物理过程不符, 本文中针对这一问题开展研究。

2 数值计算

2.1 数值计算工况设计及模型

本节设计 4 种不同头形因数的截锥形弹体, 采用显式动力学非线性有限元程序 Autodyn 建立弹体的仿真模型并开展系列工况的数值计算, 分析头形因数对弹体垂直入水后速度衰减的影响规律。

图 1 为截锥形弹体示意图, 定义弹体头部圆台直径 D_2 与主体最大直径 D_1 的比值 D_2/D_1 为截锥形弹体头形因数 ψ 。各工况中弹体主体长度 $L_1 = 30$ mm, 锥体长度 $L_2 = 10$ mm, 主体直径 $D_1 = 12$ mm 保持不变, 4 种弹体头部圆台直径分别为 0、4、8、12 mm, 对应头形因数 $\psi_1 \sim \psi_4$ 分别为 0、1/3、2/3、1。为了控制变量的数量, 不同头形因数截锥形弹体的质量均调整为 32.5 g, 有限元模型如图 2 所示。本次数值模拟采用二维轴对称建模方法, 水域网格尺寸为 400 mm×400 mm, 采用边长为 1 mm 的四边形欧拉单元进行离散, 四周设置透射边界条件, 模拟无限水域, 弹体用拉格朗日网格离散。

数值模拟中, 采用 Shock 状态方程和 Johnson-Cook 本构关系描述弹体材料的动力学

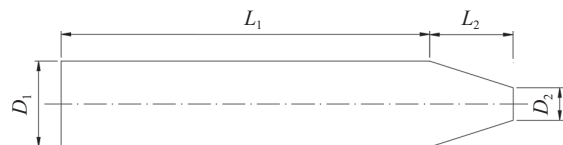


图 1 截锥形弹体示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a truncated cone-shaped projectile

学行为^[12]:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] (1 - T^{*m}) \quad (10)$$

式中: σ_y 为材料的动态屈服应力; A 为材料的静态屈服应力; B 为材料的硬化参数; ε_p 为等效塑性应变; n 为硬化指数; C 为应变率参数; $\dot{\varepsilon}$ 为等效塑性应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率, 取 $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$; $T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$, T 为温度, T_r 为室温, T_m 为材料熔化温度, m 为温度指数。本文中弹体材料选用 45 钢^[13], A 为 506 MPa, B 为 320 MPa, n 为 0.28, C 为 0.064, m 为 1.06, T_m 为 1 750 K。

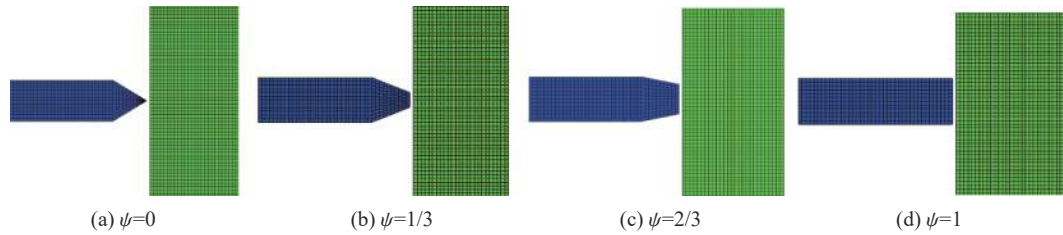


图 2 不同头形因数截锥形弹体有限元模型

Fig. 2 Finite element models for truncated cone-shaped projectiles with different head type coefficients

液体水介质采用多项式状态方程, 在水介质受压时 ($\mu > 0$):

$$p = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 E \quad (11)$$

在水介质受拉时 ($\mu < 0$):

$$p = T_1\mu + T_2\mu^2 + B_0\rho_0 E \quad (12)$$

式中: A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_0 、 B_1 、 T_1 、 T_2 为材料常数; $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, ρ 为水的瞬时密度, ρ_0 为水的参考密度; $E = (\rho gh + p_0)\rho B_0$ 为质量内能, g 为重力加速度, h 为弹体在水中的深度, p_0 为大气压力。具体参数如表 1 所示^[14]。

表 1 水的状态方程各项参数^[14]

Table 1 Parameters of equation of state for water^[14]

A_1/GPa	A_2/GPa	A_3/GPa	B_0	B_1	T_1/GPa	T_2/GPa	$\rho_0/(\text{kgm}^{-3})$
2.2	9.54	14.57	0.28	0.28	2.2	0	1 000

本文中对每种不同头形因数的截锥形弹体各设置了 5 种不同的入水初速度开展数值模拟, 共包含 20 种工况条件, 如表 2 所示。

表 2 数值计算工况

Table 2 Numerical calculation conditions

工况	ψ	$v_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	工况	ψ	$v_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	工况	ψ	$v_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	工况	ψ	$v_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1-1	0	400	2-1	1/3	400	3-1	2/3	400	4-1	1	400
1-2	0	650	2-2	1/3	650	3-2	2/3	650	4-2	1	650
1-3	0	900	2-3	1/3	900	3-3	2/3	900	4-3	1	900
1-4	0	1 150	2-4	1/3	1 150	3-4	2/3	1 150	4-4	1	1 150
1-5	0	1 400	2-5	1/3	1 400	3-5	2/3	1 400	4-5	1	1 400

2.2 有限元方法验证

采用本文的数值模拟方法对试验过程^[5]开展计算, 通过对比分析数值计算结果和试验数据来验证数值方法对高速弹体入水过程分析的可靠性和准确性。文献 [5] 中使用轻气炮发射圆柱形平头弹体, 该

弹体直径 $D=12.65$ mm, 长度 $L=25.4$ mm, 入水初速度为 603 m/s, 试验中使用高速摄影仪记录了弹体运动轨迹及空泡变化, 测量了不同时刻的空泡尺寸以及弹体速度等数据。将数值模拟得到的高速弹体入水过程中与试验^[5]中相应的数据进行对比, 弹体入水后空泡尺寸对比如图 3 所示, 可以发现在 $t=0.222$ ms 和 $t=0.440$ ms 时刻相同位置处的空泡直径数值计算结果与试验测量数据吻合较好

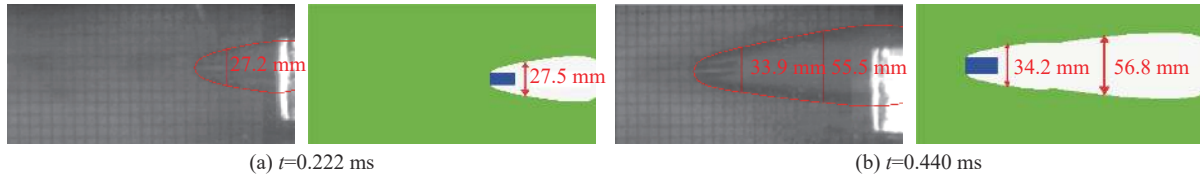


图 3 针对弹体直径为 12.65 mm, 长度为 25.4 mm, 入水初速度为 603 m/s 时, 试验与数值计算的空泡尺寸

Fig. 3 Comparison of cavitation sizes obtained experimentally and numerically for the projectile with the diameter of 12.65 cm and the length of 25.4 cm, water entering at 603 m/s

此外, 进一步开展尺寸 $D=12.65$ mm, $L=25.4$ mm 的平头圆柱形弹体入水速度 603 m/s 及 397m/s 工况; $D=12.65$ mm, $L=38.1$ mm 的平头圆柱形弹体入水速度为 498 m/s 及 414 m/s 工况的数值计算, 将弹体位移随时间的变化以及弹体速度衰减的数值计算结果与相应的试验测量数据进行对比, 如图 4~5 所示。可以看出, 本文数值模拟方法在计算弹体的运动特性方面具有较好的精度, 可为本文的进一步的研究工作开展提供了准确可靠的分析手段。

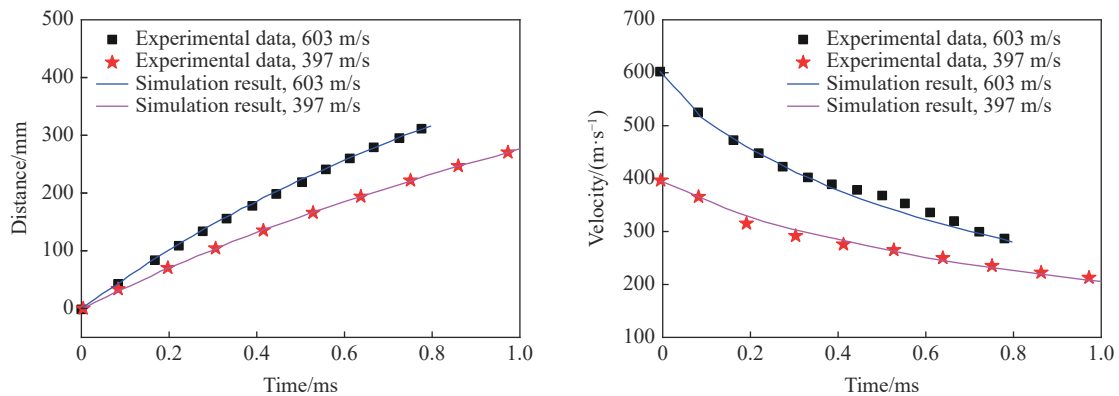


图 4 长度为 25.4 mm 的弹体在两种入水速度工况下位移和速度的变化

Fig. 4 Changes of displacement and velocity of the projectile with the length of 25.4 mm at two initial velocities of water entry

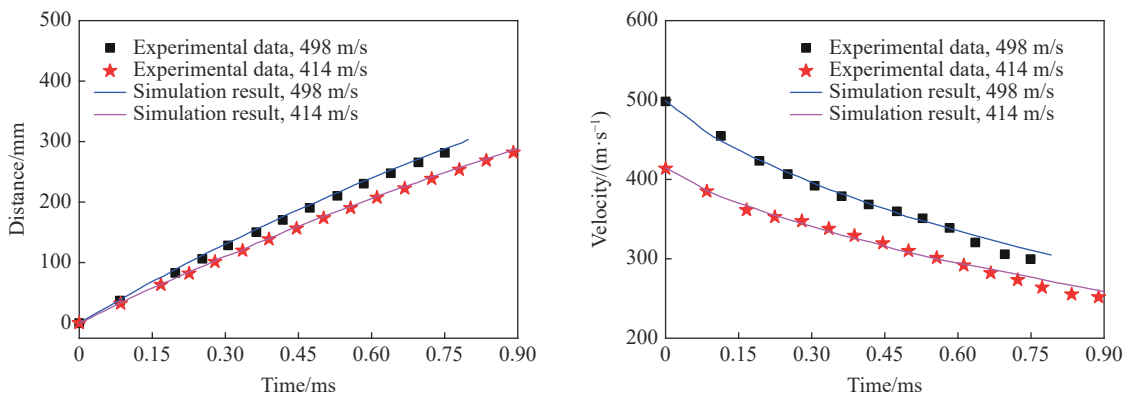


图 5 长度为 38.1 mm 的弹体在两种入水速度工况下位移和速度的变化

Fig. 5 Changes of displacement and velocity of the projectile with the length of 38.1 mm at two initial velocities of water entry

2.3 数值模拟结果及分析

采用验证后的数值模拟方法开展表 2 中 20 种工况的数值计算, 将头形因数不同的截锥形弹体在不同入水速度下的速度衰减与入水距离的关系绘制于图 6, 通过对比分析图中数据可以发现:

(1) 当截锥形弹体的头形因数不变时, 弹体入水后速度变化曲线的斜率随着入水初始速度的升高而逐渐增大, 说明入水速度越高, 速度衰减越快;

(2) 弹体入水初速度不变、头形因数增大时, 弹体剩余速度并非单纯随头形因数增大而降低, 这一特性在 $v_0=1\ 400\ \text{m/s}$ 时表现最明显。4 种头形因数的弹体均以 $1\ 400\ \text{m/s}$ 的初速度垂直入水时, 运动 $400\ \text{mm}$ 后弹体剩余速度与初速度的比值 v_b/v_0 分别为 $0.699\ 0$ 、 $0.771\ 0$ 、 $0.709\ 9$ 、 $0.512\ 7$ 。说明入水初速度不变时, 随着弹体头形因数的增大, v_b/v_0 呈现先增大后减小的趋势, 在 $\psi = 1/3$ 时达到最大, 为 0.771 。

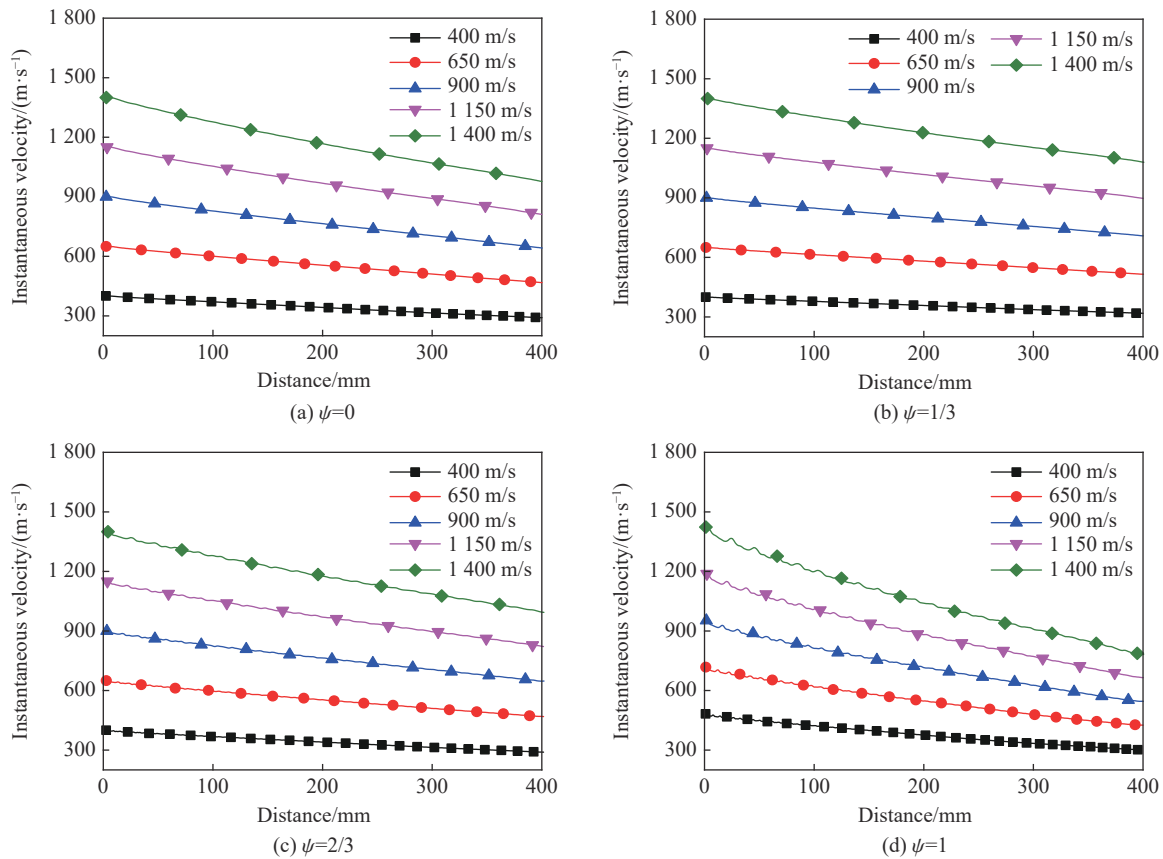


图 6 不同头形因数的截锥形弹体在不同入水速度工况下速度随入水距离的衰减

Fig. 6 Velocity attenuation of truncated cone-shaped projectiles with different head coefficients with water-entry distance at different initial velocities of water entry

3 速度衰减分析模型

3.1 模型建立

根据式(4)可以计算得出截锥形弹体垂直入水后的瞬时阻力因数 C_d , 并将其作为纵坐标, 将弹体的瞬时速度 v_b 与入水初速度 v_0 的无量纲比值作为横坐标, 绘制 $C_d-(v_b/v_0)$ 关系图。由于篇幅有限, 本文中仅绘出 $\psi=0$ 的弹体 $C_d-(v_b/v_0)$ 关系图, 如图 7 所示。从图 7 可以发现, 阻力因数 C_d 随着弹体速度的衰减呈振荡趋势, 且当截锥形弹体速度较低时, 随着侵彻过程的进行, 速度衰减率出现较小幅度的上升。究其原因是因为随着速度的降低, 弹体诱导空泡的尺寸也在不断减弱, 弹液间的接触面积增大, 摩擦阻力增大, 导致弹体的速度衰减率和阻力因数 C_d 小幅增大。

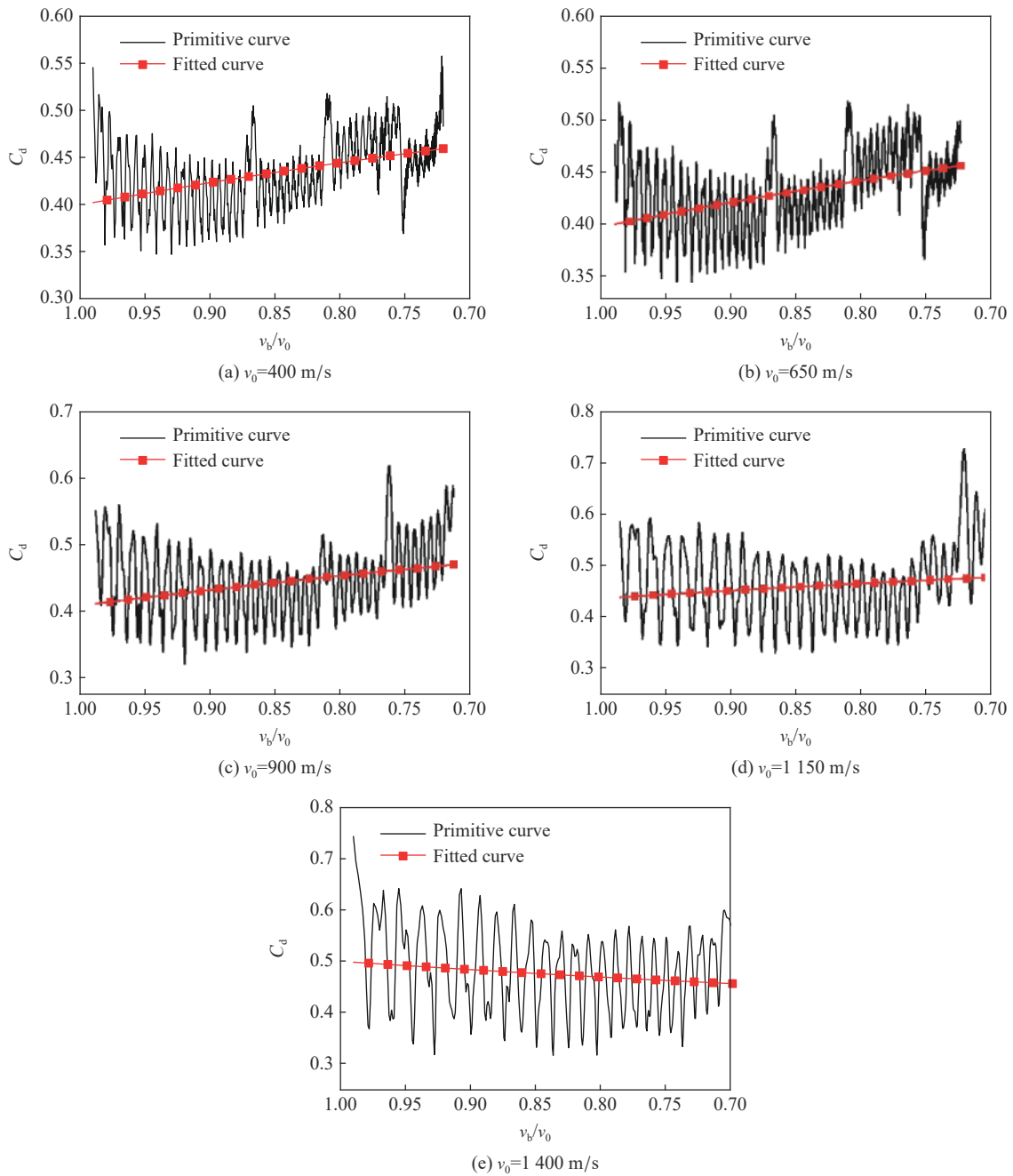


图 7 不同入水速度下, $\psi = 0$ 的截锥形弹体阻力因数与 v_b/v_0 的关系

Fig. 7 Resistance factor varying with v_b/v_0 for the truncated cone-shaped projectile with $\psi = 0$ at different water-entry velocities

从完整的侵彻过程来看, 阻力因数 C_d 变化过程较复杂, 阻力因数随着弹体速度的降低, 呈现如上述图像所示的震荡变化趋势。在以往的研究方法中将其作为常量来处理, 不具备广泛的适用性。从简化计算的角度出发, 本文中采用线性关系进行拟合:

$$C_d = a_0 + a_1 (v_b/v_0) \tag{13}$$

式中: a_0 和 a_1 为未知参数。

针对图 7 中的数据, 采用最小二乘法进行拟合, 拟合的结果如图 7 中红线所示。同时, 对头形因数 $\psi = 1/3, \psi = 2/3, \psi = 1$ 的截锥形弹体数据按照同样方式进行拟合, 确定的参数 a_0 和 a_1 列于表 3。

表 3 不同工况下的参数 a_0 和 a_1 的数值
Table 3 Values of parameters a_0 and a_1 under different working conditions

ψ	拟合参数	$v_0/(m \cdot s^{-1})$				
		400	650	900	1 150	1 400
0	a_0	0.617	0.612	0.633	0.587	0.367
	a_1	-0.217	-0.212	-0.223	-0.153	0.128
1/3	a_0	0.329	0.459	0.477	0.440	0.288
	a_1	-0.019	-0.158	-0.168	-0.113	0.077
2/3	a_0	0.768	0.707	0.784	0.714	0.553
	a_1	-0.387	-0.297	-0.394	-0.289	-0.082
1	a_0	1.216	1.204	1.527	1.382	1.416
	a_1	-0.344	-0.345	-0.823	-0.580	-0.640

水中声速取 1 400 m/s, 用最小二乘法对参数 a_0 和 a_1 进行拟合:

$$a_0 = a_{01} + a_{02}Ma + a_{03}Ma^2 + a_{04}Ma^3 + a_{05}Ma^4 \quad (14)$$

$$a_1 = a_{11} + a_{12}Ma + a_{13}Ma^2 + a_{14}Ma^3 + a_{15}Ma^4 \quad (15)$$

式中: a_{01} 、 a_{02} 、 a_{03} 、 a_{04} 、 a_{05} 、 a_{11} 、 a_{12} 、 a_{13} 、 a_{14} 、 a_{15} 为待定参数, 结果如图 8 所示。

由拟合结果来看, 四阶方程可以较好的拟合 a_0 、 a_1 关于无量纲数 M 的关系, 可以发现同一头形因数下参数 a_0 及 a_1 的高度相关, 但变化趋势相反, 近似关于某一水平线 $y=n_l$ 对称。随着头形因数的增大, 参数 a_0 及 a_1 的变化逐渐趋于复杂, 这是因为当头形因数增大时, 弹体的垂直迎流面积增大, 侵彻时镦粗变形效应变得明显, 导致阻力因数的变化趋于复杂。参数 a_0 、 a_1 的拟合结果列于表 4。

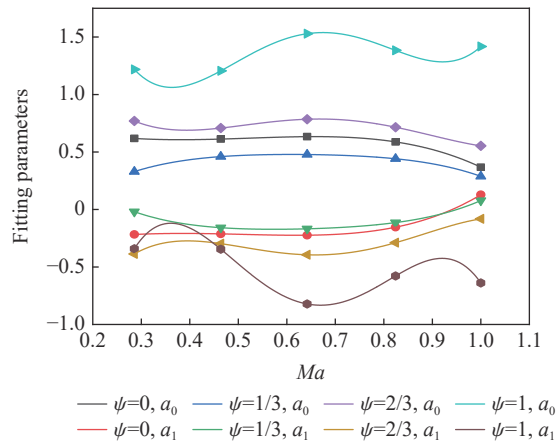


图 8 对于头形因数不同的截锥形弹体, 参数 a_0 和 a_1 与马赫数 Ma 的关系

Fig. 8 Changes of parameters a_0 and a_1 with Mach number Ma for the truncated cone-shaped projectiles with different head shape factors

表 4 参数 a_0 、 a_1 的拟合结果

Table 4 Fitting results of parameters a_0 and a_1

ψ	a_{01}	a_{02}	a_{03}	a_{04}	a_{05}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}
0	0.847	-1.459	2.575	-0.707	-0.887	-0.376	0.918	-1.096	-1.059	1.743
1/3	-0.611	6.078	-13.025	12.901	5.055	1.060	-7.042	15.285	-15.196	5.971
2/3	2.810	-15.067	37.573	-38.342	13.579	-3.246	21.137	-52.932	54.463	-19.504
1	8.033	-53.017	141.081	-153.418	58.737	-10.547	79.685	-213.159	232.929	-89.548

基于上述结果, a 系列参数仅与头形因数 ψ 有关。采用二阶方程对 a 系列参数进行最小二乘法拟合:

$$a_{ij} = a_{ij0} + a_{ij1}\psi + a_{ij2}\psi^2 \quad i = 0, 1; j = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (16)$$

式中: a_{ij0} 、 a_{ij1} 、 a_{ij2} 、 a_{ij3} 为待定参数, 结果如图 9 所示。

整体来看拟合曲线同样具有较好的对称关系。由于参数 a_1 及 a_2 的变化趋势相反, 所以拟合出的 a 系列参数具有高度对称的特性, 这是由二次函数基本特性所决定的, 拟合结果见表 5。

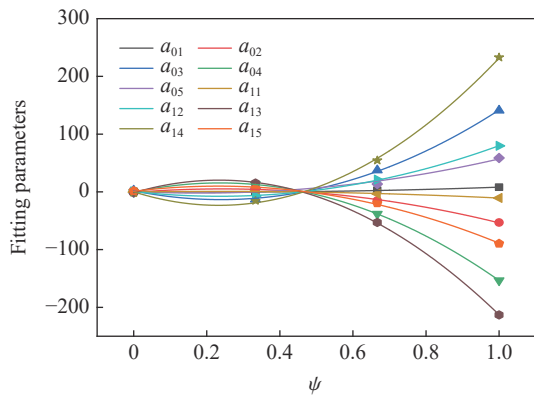


图 9 a 系列参数与头形因数 ψ 的关系

Fig. 9 Series parameters of a varied with head shape factor ψ

表 5 a_{ij} 系列参数的拟合结果

Table 5 Fitting results of a_{ij} series parameters

a_{ij}	a_{ij0}	a_{ij1}	a_{ij2}
a_{01}	0.693	-7.536	15.031
a_{02}	-0.864	49.585	-102.332
a_{03}	1.908	-128.117	267.957
a_{04}	-0.654	136.681	-289.498
a_{05}	0.814	-32.000	88.221
a_{11}	-0.239	9.212	-19.657
a_{12}	0.628	-70.273	149.620
a_{13}	-1.463	185.983	-397.312
a_{14}	0.187	-201.803	433.298
a_{15}	1.001	77.280	-167.088

综上所述, 当头形因数 ψ 不同的截锥形弹体垂直侵彻入水时可以通过如下公式计算实时阻力因数 C_d :

$$C_d = \sum_{i=0}^{j=1,2,3,4,5} a_{ij} M a^{j-1} + \left(\sum_{i=1}^{j=1,2,3,4,5} a_{ij} M a^{j-1} \right) \frac{v_b}{v_0} \quad (17)$$

式中: $a_{ij} = a_{ij0} + a_{ij1}\psi + a_{ij2}\psi^2$, 具体参数列于表 5 中。

将式(17)与式(1)联立, 可得截锥形弹体速度衰减计算模型:

$$M \frac{dv_b}{d\tau} = -\frac{1}{2} \rho_w A_0 \left[\sum_{i=0}^{j=1,2,3,4,5} a_{ij} M a^{j-1} + \left(\sum_{i=1}^{j=1,2,3,4,5} a_{ij} M a^{j-1} \right) \frac{v_b}{v_0} \right] v_b^2 \quad (18)$$

3.2 算例分析及验证

通过 2.2 节中已验证的计算方法开展系列模拟计算, 通过对公式(18)的编程求解, 得到弹体的速度衰减。将数值计算结果与上述速度衰减模型计算结果进行对比, 验证其可靠性。

验证计算中, 设置 $v_0 = 400$ m/s 速度下 1/6、1/2、5/6 等 3 种头形因数工况以及头形因数为 $\psi = 1/6$ 的弹体在 100~600 m/s 区间内 6 种入水速度工况进行验证计算, 结果如图 10~11 所示。

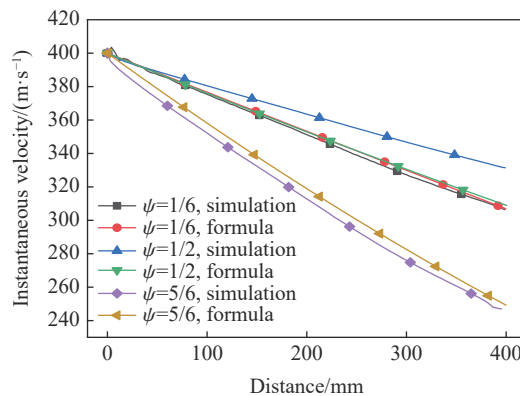


图 10 入水速度为 400 m/s, 头形因数不同的弹丸, 速度随入水距离衰减的模拟结果与公式计算结果的比较

Fig. 10 Comparison of velocity attenuation with distance between numerical simulation and formula calculation for the projectiles with different head shape factors at the initial water-entry velocity of 400 m/s

由计算可以发现, 对于弹径相同、入水初速相同而头形因数不同的弹体, 其速度衰减规律有着显著差异。本文的计算分析模型中考虑了因头形因数不同而引起的阻力因数变化对弹速衰减的影响, 与数

值计算结果吻合较好。当弹体入水初速为 400 m/s, 头形因数为 1/2 时, 数值计算数据与本文公式计算结果之间的误差约为 6.8%, 其他两种头形因数工况下误差更小; 在弹体头形因数为 1/6、不同速度工况中, 公式计算与数值模拟结果之间的最大误差约为 8.71%。

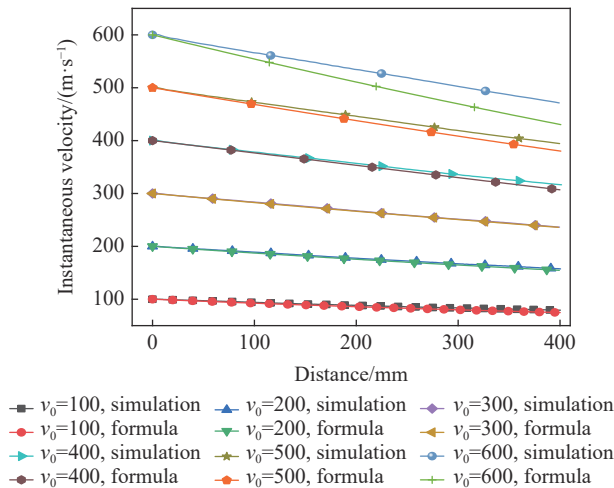


图 11 头形因数为 1/6, 入水速度不同的弹丸, 速度随入水距离衰减的模拟结果与公式计算结果的比较

Fig. 11 Comparison of velocity attenuation with distance between numerical simulation and formula calculation for the projectile with the head shape factor of 1/6 at different initial water-entry velocities

从上述对比结果可以发现, 本文的速度衰减模型可对不同头形因数的截锥形弹体垂直侵彻液体介质过程中的速度衰减进行快速预报, 弥补了以往研究中将阻力因数 C_d 当作常量计算的不足, 更符合弹体垂直侵彻液体介质的实际物理过程。

4 结 论

本文中提出了与弹体形状和无量纲速度相关的阻力因数的计算方法, 通过建立运动方程得到了截锥形弹体垂直侵彻液体介质速度衰减的计算分析模型。并通过算例分析, 验证了本文计算方法的可靠性。得到以下结论:

(1) 高速弹体在液体介质中运动方程的阻力因数与弹体形状和无量纲速度有关; 该因数对弹体高速运动过程中与液体的接触面积进行了修正, 将弹体头形因数和速度因素考虑在内, 更接近实际的物理过程。

(2) 将阻力因数引入运动方程后得到的计算结果与数值模拟数据吻合较好, 说明本文提出的分析模型可对不同头形因数的截锥形弹体垂直侵彻液体介质过程中的速度衰减进行快速预报。

(3) 由于弹体侵彻液体时的作用机理非常复杂, 且弹体高速侵彻时会发生弹体镦粗和变形, 同时流体具有可压缩性, 对弹速衰减影响较大。本文的分析中未考虑其影响, 在后续工作中将进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 孔祥韶. 爆炸载荷及复合多层防护结构响应特性研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013: 1-26. DOI: 10.7666/d.Y2364126.
- [2] LEE M, LONGORIA R G, WILSON D E. Cavity dynamics in high-speed water entry [J]. *Physics of Fluids*, 1997, 9(3): 540-550. DOI: 10.1063/1.869472.
- [3] 李营, 张磊, 朱海清, 等. 爆炸破片在液舱中的速度衰减特性研究 [J]. *中国造船*, 2016, 57(1): 127-137. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2016.01.014.

LI Y, ZHANG L, ZHU H Q, et al. Velocity attenuation of blast fragments in water tank [J]. *Shipbuilding of China*, 2016,

- 57(1): 127–137. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2016.01.014.
- [4] 沈晓乐, 朱锡, 侯海量, 等. 高速破片侵彻防护液舱试验研究 [J]. *中国舰船研究*, 2011, 6(3): 12–15. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2011.03.003.
SHEN X L, ZHU X, HOU H L, et al. Experimental study on penetration properties of high velocity fragment into safety liquid cabin [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2011, 6(3): 12–15. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2011.03.003.
- [5] 郭子涛. 弹体入水特性及不同介质中金属靶的抗侵彻性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 21-36. DOI: 10.7666/d.D241209.
- [6] ZHAO B L, ZHAO J G, CUI C Y, et al. Growth model of cavity generated by the projectile impacting liquid-filled tank [J]. *Defence Technology*, 2020, 16(3): 609–616. DOI: 10.1016/j.dt.2019.09.013.
- [7] ZHANG Y, LI X B, LI S Y. Research on the velocity attenuation characteristics of the fragments during high-speed water entry [C] // Proceedings of the 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Madrid: ASME, 2018. DOI: 10.1115/OMAE2018-78665.
- [8] VARAS D, ZAERA R, LÓPEZ-PUENTE J. Numerical modelling of partially filled aircraft fuel tanks submitted to Hydrodynamic Ram [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2012, 16(1): 19–28. DOI: 10.1016/j.ast.2011.02.003.
- [9] BIRKHOFF G, CAYWOOD T E. Fluid flow patterns [J]. *Journal of Applied Physics*, 1949, 20(7): 646–659. DOI: 10.1063/1.1698450.
- [10] 孔祥韶, 吴卫国, 刘芳, 等. 舰船舷侧防护液舱对爆炸破片的防御作用研究 [J]. *船舶力学*, 2014, 18(8): 996–1004. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2014.08.015.
KONG X S, WU W G, LIU F, et al. Research on protective effect of guarding fluid cabin under attacking by explosion fragments [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2014, 18(8): 996–1004. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2014.08.015.
- [11] LECYSYN N, BONY-DANDRIEUX A, APRIN L, et al. Experimental study of hydraulic ram effects on a liquid storage tank: analysis of overpressure and cavitation induced by a high-speed projectile [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 178(1/2/3): 635–643. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.01.132.
- [12] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C] // Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. Netherlands: The Hague, 1983.
- [13] 陈刚, 陈忠富, 陶俊林, 等. 45 钢动态塑性本构参量与验证 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(5): 451–456. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)05-0451-06.
CHEN G, CHEN Z F, TAO J L, et al. Investigation and validation on plastic constitutive parameters of 45 steel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(5): 451–456. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)05-0451-06.
- [14] 李晓杰, 张程娇, 王小红, 等. 水的状态方程对水下爆炸影响的研究 [J]. *工程力学*, 2014, 31(8): 46–52. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.03.0180.
LI X J, ZHANG C J, WANG X H, et al. Numerical study on the effect of equations of state of water on underwater explosions [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(8): 46–52. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.03.0180.

(责任编辑 张凌云)