

doi: 10.7690/bgzdh.2021.11.002

# 聚能射流的水下成型及毁伤效果

戎 鑫, 梁增友, 邓德志, 刘 洋, 芦永进

(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

**摘要:** 为分析聚能射流在水介质中的运动规律、形态变化及对靶板的毁伤效果, 对锥角药型罩结构的聚能战斗部形成的聚能射流进行数值仿真模拟。在考虑静水压力的条件下, 用 AUTODYN 对聚能射流在水下 1、10 和 50 m 侵彻水介质时的形态变化、速度衰减及对靶板的侵彻效果进行了数值模拟, 并与相同炸高下空气中形成的射流进行对比。结果表明: 射流头部会随着水深的加深发生明显的堆积现象; 速度在空腔中呈线性规律衰减, 在水介质中呈指数规律衰减; 相同炸高条件下, 水中的聚能射流对靶板的侵彻孔径比空气中大。

**关键词:** 射流; 静水压力; 毁伤效能; 战斗部设计; 数值仿真

**中图分类号:** TJ413 **文献标志码:** A

## Underwater Shaping and Damage Effect of Shaped Energy Jet

Rong Xin, Liang Zengyou, Deng Dezhi, Liu Yang, Lu Yongjin

(School of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to analyze the motion law, shape change and damage effect of the shaped-energy jet in the water medium, the numerical simulation of the shaped-energy jet formed by the shaped-energy warhead of the cone-shaped charge-shaped cover structure is carried out. Under the condition of considering the hydrostatic pressure, AUTODYN is used to numerically simulate the shape change, velocity attenuation and penetration effect of the target plate when the shaped energy jet penetrates the water medium at 1 m, 10 m and 50 m underwater, and it is compared with the jet formed in the air at the same height. The results show that the jet head will accumulate obviously as the water depth deepens; the velocity decays linearly in the cavity and exponentially decays in the water medium; under the same explosive height conditions, the penetration aperture of the concentrated jet in the water into the target is larger than that in the air.

**Keywords:** jet; hydrostatic pressure; damage effectiveness; warhead design; numerical simulation

## 0 引言

成型装药在一端引爆后, 炸药快速发生爆轰反应, 爆炸产生的压力作用于药型罩上, 之后药型罩以很高的速度向中心轴线闭合, 闭合后形成一个高温高速的聚能金属射流。

经过多年的发展, 国内对聚能战斗部的研究有了一定的进展。裴明敬等<sup>[1]</sup>通过设计新型的聚能战斗部结构, 进行射流侵彻水夹层复合靶的试验, 得出可通过改变炸高来提高对复合靶的破坏毁伤效果。张向荣等<sup>[2]</sup>通过数值仿真研究了在相同炸高条件下, 钨铜射流在不同介质(空气、水)中侵彻靶板的过程, 得出水介质会令射流头部产生明显的侵蚀现象并使头部速度减小的结论。郭刘伟等<sup>[3]</sup>通过试验得出了药型罩结构对射流速度的衰减影响较大, 合适的药型罩结构可有效提高射流速度。史进伟等<sup>[4]</sup>通过理论结合实验的方法建立了射流侵彻间隔靶的理论计算模型。王长利等<sup>[5-7]</sup>通过一系列试验

对聚能装药侵彻水中目标的毁伤效果进行了研究, 发现水中冲击波对毁伤效果影响较大。李兵等<sup>[8]</sup>利用试验与仿真结合的方法得出金属射流、冲击波载荷及气泡脉动是对双层圆柱壳结构造成毁伤的主要破坏载荷。

笔者基于 AUTODYN 软件对锥角药型罩结构的聚能战斗部形成的聚能射流进行了数值仿真模拟, 分析了不同水深环境下对其成型、运动规律及毁伤效果的影响, 并对聚能战斗部在空气中成型、运动规律及毁伤效果进行了数值模拟。计算结果可为水中聚能战斗部的设计提供参考。

## 1 几何模型与数值仿真

### 1.1 几何模型的建立

聚能战斗部的 2 维平面结构如图 1 所示。其中装药直径为 36 mm, 战斗部长度为 45.2 mm, 壳体厚度为 2 mm, 药型罩采用等壁厚的 60°锥角结构, 壁厚为 1.8 mm。

收稿日期: 2021-07-11; 修回日期: 2021-08-22

基金项目: 山西省自然科学基金项目(201801D121107)。

作者简介: 戎 鑫(1996—), 男, 山西人, 硕士, 从事弹药工程与毁伤技术研究。E-mail: 1352130782@qq.com。

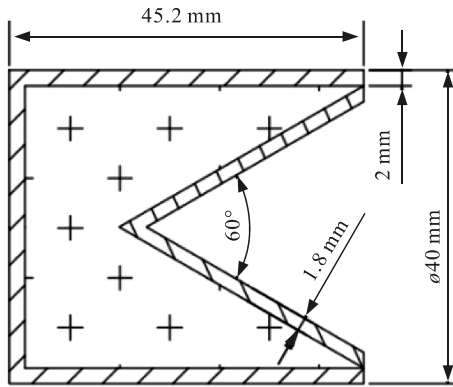
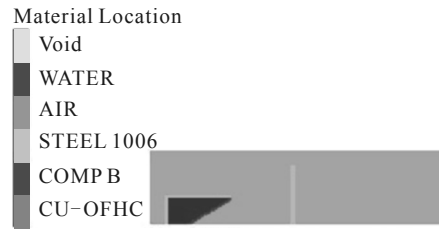


图 1 聚能战斗部 2 维结构



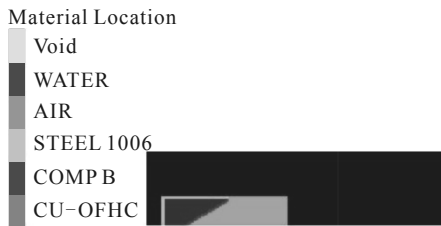
(b) 聚能战斗部侵彻空气中靶板的有限元模型

图 3 聚能战斗部侵彻不同介质中靶板的有限元模型

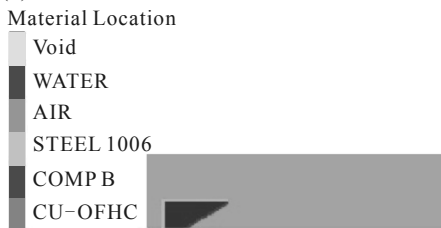
1.2 数值仿真

1.2.1 有限元模型

由于聚能战斗部为轴对称结构，为减少计算时间，只需建立 1/2 模型。其中，聚能装药选用 B 炸药，药型罩材料选用紫铜，壳体和靶板都是 1006 钢，靶板厚 4 mm。有限元模型如图 2、3 所示。

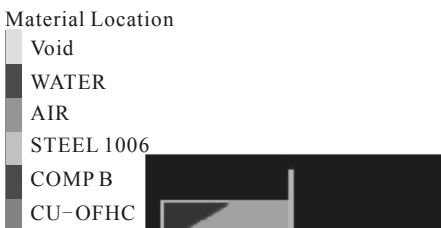


(a) 聚能战斗部侵彻水介质的有限元模型



(b) 聚能战斗部侵彻空气介质的有限元模型

图 2 聚能战斗部侵彻不同介质的有限元模型



(a) 聚能战斗部侵彻水中靶板的有限元模型

1.2.2 CEL 算法

耦合欧拉-拉格朗日算法 (CEL 算法) 最早由 Noh<sup>[9]</sup>提出，该方法最大限度地克服了欧拉和拉格朗日算法存在的缺陷，在分析大变形物体和聚能射流成型及运动特性的问题上具有显著优势。

笔者采用集成 CEL 算法的大型商业软件 AUTODYN 进行数值分析，分别建立流体和固体模型。流体(空气、水)和炸药采用欧拉单元进行模拟，以防止在流体和炸药产生大变形时单元网格发生畸变；用拉格朗日单元模拟固体(壳体、靶板)，并用流固耦合算法处理流固交界面。

1.2.3 材料模型及主要参数

AUTODYN 软件中水的状态方程有 Polynomial(多项式)状态方程与 Shock 状态方程 2 种，因为多项式状态方程可通过设置水介质的比内能来赋予不同深度环境水域的静水压力，所以采用 Polynomial 状态方程。

静水压力的一般计算公式为：

$$P=P_0+\rho gh。$$

式中  $P_0$  为水面处的大气压，取 101.3 kPa。

利用水的 Polynomial 状态方程给水施加不同的静水压力<sup>[10]</sup>，以模拟不同水深的环境。不同水深的静水压力如表 1 所示。水和其余材料均来自 AUTODYN 软件自带的材料库，相关模型和参数见表 2。

表 1 不同水深的静水压力

水深/m	静水压力/kPa	内能/(J/kg)
1	111.1	396.785 7
10	119.3	711.785 7
50	591.3	2 111.785 7

表 2 材料模型及主要参数

材料	状态方程	强度模型	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	剪切模量/kPa	屈服强度/kPa
水	Polynomial		1.000		
空气	Ideal Gas		1.225e-3		
1006 钢	Shock	Johnson Cook	7.896	8.18e7	3.5e5
B 炸药	JWL		1.717		
紫铜	Shock	Steinberg Guinan	8.930	4.77e7	1.2e5

## 2 仿真结果与分析

### 2.1 聚能射流在水中成型及运动特性分析

表 3 给出了不同水深条件下射流在 20、25、30、35 和 40  $\mu\text{s}$  的形态，并且给出了对应时刻射流在空气中的运动形态以作为对比。

20  $\mu\text{s}$  左右，射流在空腔中基本成型，此时不同水深条件下射流的形态与在空气中成型的射流形态基本相近，并无明显差别。随着射流侵彻水介质时间的加长，射流头部有明显堆积现象且射流形态由

短粗变为细长，射流的长径比在增大；除 1 m 水深条件下射流在 40  $\mu\text{s}$  时断裂较为严重，其余水深条件下射流的断裂不明显，且随着水深不断变大，射流头部的堆积更加严重。与空气中运动的射流相比，水下射流的断裂现象较轻。主要是由于空气是可压缩流体，阻力小，射流在运动过程中会出现断裂而没有明显的堆积。

表 4 给出了不同时刻不同工况下射流的头部速度数据。射流的头部速度在不同水深条件下和空气中随时间变化的速度—时间图如图 4 所示。

表 3 典型时刻聚能射流的形态

时间/ $\mu\text{s}$	水深/m			空气
	1	10	50	
20				
25				
30				
35				
40				

表 4 不同时刻射流的头部速度

时间/ $\mu\text{s}$	水深/m			空气
	1	10	50	
20	4 247.4	4 251.3	4 260.2	4 352.4
22	4 025.6	4 062.1	4 042.2	4 350.6
24	3 868.0	3 880.8	3 861.3	4 345.8
26	3 797.5	3 728.5	3 790.6	4 343.4
28	3 653.1	3 679.8	3 632.4	4 339.1
30	3 504.0	3 568.9	3 515.8	4 335.1
32	3 449.5	3 429.8	3 467.0	4 330.1
34	3 331.2	3 414.0	3 377.7	4 324.7
36	3 208.0	3 281.1	3 289.4	4 319.4
38	3 164.8	3 182.8	3 222.3	4 316.5
40	3 060.2	3 169.5	3 183.9	4 313.9

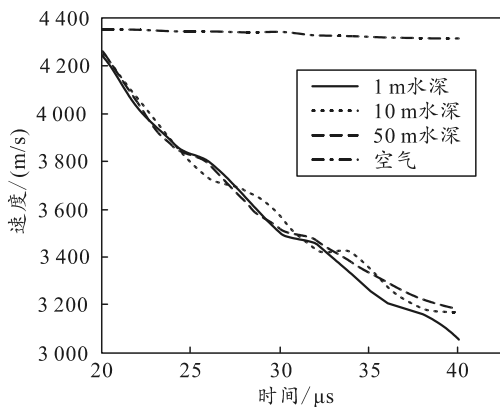


图 4 射流的头部速度随时间变化

从上图中可看出，射流在空气中的速度衰减量明显小于相同时间下射流在水中的速度衰减量。在 20~24  $\mu\text{s}$  内射流在空腔中运动，不同水深条件下射流的速度呈线性衰减。之后射流进入水中开始侵彻水介质，不同水深处射流的头部速度变化趋向指数

函数规律。射流在相同时刻不同水深条件下的速度波动差距不大，最大值不超过 100 m/s，头部速度的上下波动可能与射流头部的断裂、堆积有关。

### 2.2 射流对靶板的毁伤效果分析

高速运动的聚能射流与靶板接触后，靶板开始出现冲塞凹陷现象，随着凹陷程度的加大，产生冲塞破口。此时射流继续向前运动，破口周边的靶板结构受到爆轰产物的作用，靶板开始以类花瓣状开裂，在杆体和爆轰产物的持续作用下，开裂的幅度不断增大，最终形成图 5 所示的靶板毁伤破坏图。



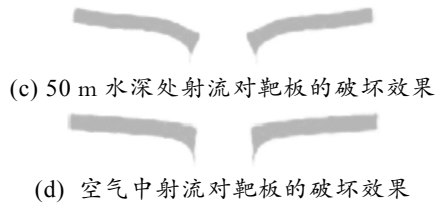


图 5 聚能射流对靶板的破坏效果

由上图可知：聚能射流在水下比在空气中对靶板的破坏程度大，水中靶板的变形程度和破孔孔径均要大于空气中的靶板。主要是因为水中冲击波的强度要远大于空气中冲击波的强度，且作用时间较长。不同水深条件下，靶板的变形程度和破孔孔径相差不大，具体数值见表 5 所示。

表 5 靶板孔径

仿真参数	水深/m			空气
	1	10	50	
靶板正面孔径大小/mm	13.24	13.92	13.52	13.18
靶板背面孔径大小/mm	15.65	16.88	16.69	14.20
孔径差值/mm	2.41	2.96	2.17	1.02
孔径差值/装药口径	0.07	0.08	0.06	0.03

由上表可知：空气中的靶板在聚能射流的侵彻作用下形成的孔径 0.03 明显低于水介质中射流侵彻靶板后形成的孔径 0.06、0.07 和 0.08，不同水深条件下孔径差值并不大，说明射流侵彻靶板的破坏效果与水深的变化关联不大。

### 3 结束语

笔者通过数值模拟对射流侵彻水介质的过程以及对靶板的毁伤过程进行了分析，并在炸高相同的条件下，与空气中射流的运动及毁伤效果进行了对比。经上述仿真分析可得到如下结论：

1) 与空气中相比，聚能射流在侵彻水介质的过程中，其头部会产生明显的金属堆积，随着水深的加深，堆积现象会更加明显。

2) 聚能射流在空腔中的头部速度呈线性规律衰减，在进入水介质后头部速度呈指数规律衰减且不同水深处的射流头部速度在同一时刻下出现数值的上下波动现象。

3) 射流侵彻水中靶板的孔径比侵彻空气中靶板的孔径大，不同水深的变化条件对射流侵彻靶板的毁伤效果影响不大。

### 参考文献：

[1] 裴明敬, 李成兵. 聚能装药侵彻水夹层复合实验的研

究(英文)[J]. 火炸药学报, 2008, 31(3): 15-19.

[2] 张向荣, 黄风雷. 炸高对钨铜射流空气及水中侵彻的影响[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(3): 262-264.

[3] 郭刘伟, 曹仁义, 庞勇, 等. 聚能射流水中侵彻行为的实验研究[J]. 实验力学, 2015, 30(1): 111-116.

[4] 史进伟, 罗兴柏, 蒋建伟, 等. 射流侵彻水夹层间隔靶的理论 and 实验研究[J]. 含能材料, 2016, 24(3): 213-218.

[5] 王长利, 周刚, 冯娜, 等. 水深对毁伤效应的影响实验研究[J]. 中国测试, 2018, 44(10): 89-95.

[6] 王长利, 周刚, 马坤, 等. 典型含水复合结构在聚能装药水下爆炸作用下的毁伤[J]. 船舶力学, 2018, 22(8): 1001-1010.

[7] 王长利, 马坤, 周刚, 等. 防雷舱结构在聚能装药水下爆炸作用下的毁伤研究[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(5): 1145-1154.

[8] 李兵, 刘念念, 陈高杰, 等. 水中聚能战斗部毁伤双层圆柱壳的数值模拟与试验研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(1): 38-45.

[9] 门建兵, 蒋建伟, 王树有. 爆炸冲击数值模拟技术基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015: 31.

[10] 胡毅亭, 贾宪振, 饶国宁, 等. 水下爆炸冲击波和气泡脉动的数值模拟研究[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(2): 134-140.