

doi: 10.7690/bgzdh.2026.05.015

组合药型罩材料对水中毁伤元侵彻性能的影响

徐鹤峰, 陈晓辉, 董兴, 王洪彬, 潘慧莹, 梁帅, 王鑫
(辽沈工业集团有限公司, 沈阳 110045)

摘要: 针对组合药型罩形成的毁伤元在水中侵彻能力大大加强, 设计一种锥-球缺组合的药型罩。通过改变锥-球药型罩材料, 确定仿真方案进行数值模拟。锥-球组合药型罩不同材料匹配下结果表明: 铝-钨时, 战斗部侵彻能力最强; 铝-铝时, 侵彻靶板的孔径最大; 铝-钨时, 侵彻深度最大; 铝-铜时, 其侵彻靶板的综合性能更为显著。

关键词: 组合药型罩; 数值仿真; 药型罩材料; 水中毁伤元

中图分类号: TJ410.3⁺33 **文献标志码:** A

Effect of Composite Liner Material on Penetration Performance of Underwater Damage Element

Xu Hefeng, Chen Xiaohui, Dong Xing, Wang Hongbin, Pan Huiying, Liang Shuai, Wang Xin
(Liaoshen Industrial Group Co., Ltd., Shenyang 110045, China)

Abstract: In order to enhance the penetration ability of the damage element formed by the combined liner in water, a cone-spherical shaped charge liner was designed. By changing the material of cone-sphere shaped charge liner, the simulation scheme was determined to carry out numerical simulation. The results of different material matching of cone-sphere combined liner show that the penetration ability of the warhead is the strongest when Al-W is used; the penetration aperture of the warhead is the largest when Al-Al is used; the penetration depth of the warhead is the largest when Al-W is used; the comprehensive performance of its penetration target is more significant when Al-Cu is used.

Keywords: combined shaped charge liner; numerical simulation; liner material; underwater damage element

0 引言

随着现代潜艇防护能力的大幅度提高, 其抗侵彻毁伤能力增强, 主要体现在舰艇采用高强度合金钢作为壳体及采用双层壳体结构^[1]等方面, 这对传统爆破式反潜弹药的威力提出了严峻挑战, 传统鱼雷战斗部已经很难胜任^[2]。然而组合药型罩的出现, 极大程度地改善了这一难题。周方毅等^[3]通过理论和试验发现圆锥、球缺组合药型罩战斗部对目标的破坏能力大大加强。廖莎莎等^[4]通过试验分析了钨铜合金药型罩和紫铜药型罩射流的水中侵彻特性。王宝林等^[5]研究含能材料药型罩的实际效果, 并将其应用在反跑道战斗部药型罩实验中。Mehmannavaz 等^[6]通过实验与仿真相比较, 得出铜-铝罩具有良好的侵彻深度和孔洞直径。吴成等^[7]根据侵彻流体力学理论和射流最大开坑孔径 Szendrei 公式可知, 药型罩材料的塑性、密度和声速与侵彻性能直接相关。李必红等^[8]研究不同结构及壁厚对球锥形药型罩静破甲深度与穿孔孔径的影响, 得出壁厚 1 mm 时底部开孔的球锥形药型罩侵彻深度最大。孔繁家等^[9]通过 LS-DYNA 软件分析了罩顶材

料对双锥药型罩成型及侵彻性能的影响。张小静等^[10]运用 Autodyn 软件研究了锥罩材料对组合药型罩射流成型的影响。郭腾飞等^[11]针对钽材料在成型装药战斗部中的应用进行了研究。Lee 等^[12]通过理论与实验相结合得出射流侵彻水介质的相关毁伤参数。Janzon 等^[13]认为由于现代舰艇大多采用双层水间隔装甲, 所以使用球缺罩的鱼雷战斗部形成 EFP 来侵彻。笔者将探究锥、球药型罩材料的不同对其毁伤元在水中形成的影响。

1 理论分析

准定常理想不可压缩流体理论与 Birkhof 的经典理论源于同一概念。Pugh 等认为对于所有药型罩上不同微元的压垮速度是变化的, 而不是恒定的, 具体取决于药型罩微元的最初位置; 因此, 从药型罩顶部到底部的压垮速度不断降低, 导致产生较大的射流延伸。据此, 提出了准定常理想不可压缩流体力学理论(PER 理论), 该理论极大地改进了定常理论的计算结果, 假设条件:

1) 假设爆轰波到达罩面后, 使该处罩微元立即

达到压垮速度，并以不变的大小和方向运动：

- 2) 罩内外层速度差可以忽略不计；
- 3) 罩金属视为理想不可压缩流体。

如图 1 所示，聚能射流形成的准定常过程中，在 $\triangle AEB$ 中，由正弦定理可得：

$$v_1 = \frac{v_0 \cos(\beta - \alpha - \delta)}{\sin \beta}; \quad (1)$$

$$v_2 = \frac{v_0 \cos(\alpha + \delta)}{\sin \beta}. \quad (2)$$

在固定坐标系中，射流和杵体的速度分别为：

$$v_j = v_1 + v_2; \quad (3)$$

$$v_s = v_1 - v_2. \quad (4)$$

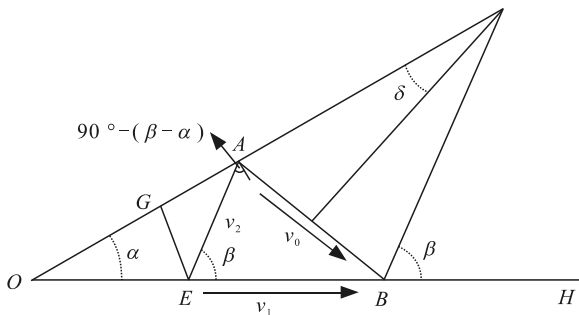


图 1 聚能射流形成

利用式(2)–(4)可计算出射流和杵体的速度：

$$v_j = v_0 \cos \frac{\beta}{2} \cos(\alpha + \delta - \frac{\beta}{2}); \quad (5)$$

$$v_s = v_0 \sec \frac{\beta}{2} \sin(\alpha + \delta - \frac{\beta}{2}). \quad (6)$$

式中 $\delta = \frac{1}{2}(\beta - \alpha)$ 。

在 v_j 、 v_s 、 m_j 、 m_s 4 个未知数中 m_j 、 m_s 需先求得，根据质量守恒和动量守恒原理可得：

$$dm = dm_j + dm_s; \quad (7)$$

$$\frac{dm_j}{dm} = \sin^2 \frac{\beta}{2}; \quad (8)$$

$$\frac{dm_s}{dm} = \cos^2 \frac{\beta}{2}. \quad (9)$$

PER 理论给出了 v_j 、 v_s 、 m_j 、 m_s 、 δ 和 β 的表达式，而未知数的数量超过了独立方程的个数；为此，还需采用炸药—金属相互作用模型，如格尼模型，确定压垮速度，从而使整个过程封闭，便于求解。格尼模型的表达式为：

$$\sin \delta = \frac{v_0}{2U}. \quad (10)$$

式中 U 为爆轰波扫过药型罩的速度。

根据上述公式可得出射流与杵体的速度。

2 数值模拟

2.1 战斗部结构设计

组合药型罩是由圆锥罩和球缺罩组合，圆锥罩形成射流用于前级穿孔以及为后续毁伤元提供低能耗通道。设计组合药型罩的装药高度为 60 mm，口径为 40 mm，药型罩高度为 40 mm，壁厚均为 1 mm，壳体厚度 1 mm，空气域为 80 mm×42 mm，水域为 410 mm×60 mm，锥角 50°，球缺罩内外表面曲率半径分别为 25、26 mm，几何结构如图 2 所示，3 维模型如图 3 所示。通过改变组合药型罩的材料来分析其毁伤元在水中的毁伤特性。

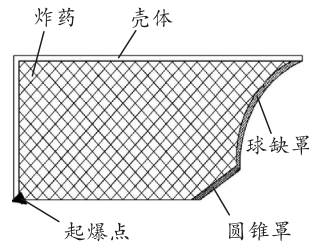


图 2 几何结构

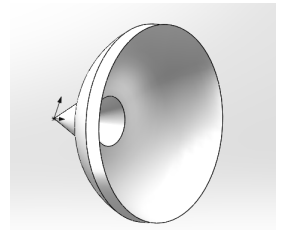


图 3 3 维模型

2.2 材料模型

数值模拟的材料选自 Autodyn 的材料库，聚能装药选用 B 炸药，其状态方程用以计算爆轰产物的压力，方程为：

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}; \quad (11)$$

$$V = \frac{\rho_0}{\rho}; \quad (12)$$

$$E = \rho_0 e. \quad (13)$$

式中： ρ_0 为炸药初始密度； ρ 为产物密度； e 为内能； E 为炸药单位体积中的内能； $A=524.2$ GPa； $B=7.678$ GPa； $R_1=4.2$ ； $R_2=1.1$ ； $\omega=0.34$ 。B 炸药的装药密度为 1.717 g/cm³，爆速为 7 980 m/s，爆压为 2.95×10⁷ kPa^[14]，其余材料模型如表 1 所示。

表 1 材料模型

材料名称	状态方程	强度模型	失效模型
AIR	Idea Gas	None	None
AL 2024	Shock	None	None
COMP B	JWL	None	None
CU-OFHC	Linear	Johnson Cook	None
WATER	Shock	None	None
TANTALUM	Shock	Steinberg Guinan	None
TUNGSTEN	Shock	None	None
STEEL 4340	Linear	Johnson Cook	None

2.3 数值模拟

数值模拟采用 mm-mg-ms 单位制，在 Autodyn-2D 中创建组合药型罩有限元模型，如图 4 所示。



图 4 组合药型罩有限元模型

图 4 中分别由锥形药型罩、球缺药型罩、炸药、壳体、空气、水域组成，采用拉格朗日和欧拉耦合算法进行仿真计算，空气域边界类型定义为 Flow-Out，模拟无限空间，防止材料在边界反射使得仿真结果失真，保证仿真的可靠性。

2.4 战斗部作用过程

由于毁伤元需在水中运动一段时间后才能继续毁伤靶板，因此水对毁伤元毁伤效果具有重要的影响。从以往的工程实践可知，水对射流的影响是显而易见的，但正是由于圆锥罩形成射流的存在，排开了水的质量，使毁伤元在运动过程中能量损耗较小，从而加强对目标的破坏作用。毁伤元成型过程如图 5 所示。

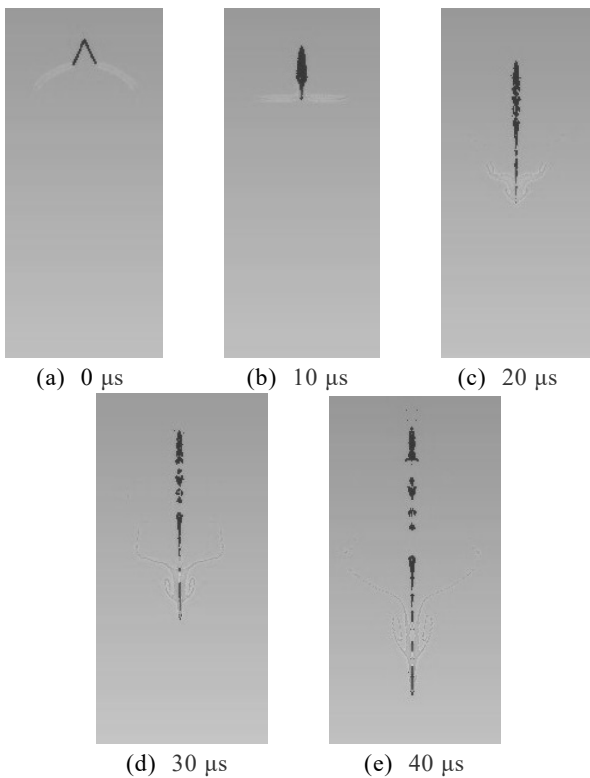


图 5 毁伤元成型过程

3 仿真结果及侵彻性能分析

3.1 仿真结果

笔者主要研究圆锥-球缺组合药型罩材料对其毁伤元在水中形成过程及水中运动特性的影响，仿真研究当分别选取铜、铝、钽、钨作为药型罩的材

料时，根据上述战斗部设计的结构，进行 2 种不同情况下的水中数值仿真。第 1 种方案是当锥罩材料为铝时，分析球缺罩材料对毁伤元形成的影响，第 2 种方案是当球缺罩材料为铜时，分析锥罩材料对毁伤元形成的影响。取 40 μs 时的毁伤元头尾部速度以及毁伤元头部直径和动能作为结果进行分析，如图 6—7 所示。AL/Ta 代表锥-球组合药型罩材料分别为铝、钽。

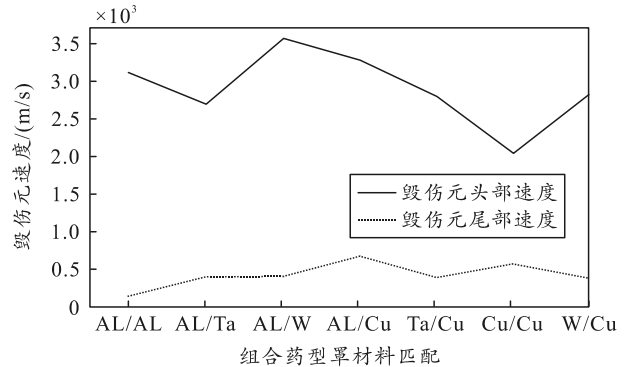


图 6 毁伤元头尾速度随药型罩材料的变化

从图 6 可以看出：在上述设计的战斗部结构当中，锥-球药型罩材料为铝-钨时，所形成的毁伤元的头部速度是最大的；铝-钽时，形成的毁伤元的头部速度是最小的；铝-铜时，其毁伤元头部速度是最大的；铜-铜时，其毁伤元头部速度是最小的。

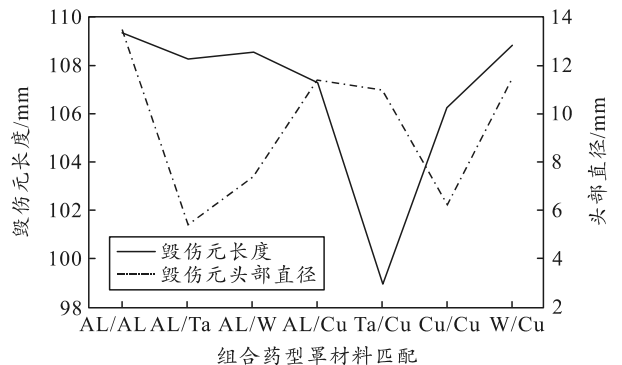









图 7 毁伤元长度及头部直径随药型罩材料的变化

由图 7 可知：锥-球药型罩材料组合不同，所形成的毁伤元长度是不同的。当锥-球药型罩的材料为铝-钽时，所形成的毁伤元的头部直径是最小的；同时，当锥-球药型罩的球缺罩材料一定，锥罩材料为钽时，所形成的毁伤元的长度是最短的。

3.2 侵彻性能分析

采用上述的锥-球药型罩材料及结构，建立 2 维靶板模型，取炸高在 2 倍装药直径下，在水中侵彻厚度为 100 mm、宽度为 50 mm 的钢板，分析其侵彻性能，结果如表 2 所示。

表 2 锥-球药型罩不同材料对目标的侵彻性能 mm

试验号	靶板效果	侵彻深度	开孔直径
Al/Al		23.40	20.80
Al/W		94.27	11.43
Al/Ta		61.00	7.68
Al/Cu		46.50	17.76
Ta/Cu		34.02	2.98
Cu/Cu		38.20	14.10
W/Cu		49.50	13.60

由表 2 可知：当锥-球组合药型罩材料为铝-钨时，其毁伤元侵彻能力最强；铝-铝时，毁伤元侵彻靶板的孔径最大；当铝-钨作为锥-球组合药型罩材料时，其毁伤元侵彻的深度最大；铝-铜时，毁伤靶板的综合性能更为显著。

4 结论

1) 锥罩材料一定，球缺罩材料为钨时，其毁伤元的头部速度都是最大的；2) 钨作为锥罩材料时，其形成的毁伤元的长度偏小；3) 锥罩材料一定，球缺罩材料为密度较大的钨或钨时，其所形成的毁伤元的头部直径较小。

参考文献：

[1] 马运义. 对潜艇采用单、双壳体结构的分析意见及建议[J]. 舰船科学技术, 2001(6): 1-9.
 [2] 凌荣辉, 钱立新, 唐平, 等. 聚能型鱼雷战斗部对潜艇目标毁伤研究[J]. 弹道学报, 2001(2): 23-27.

[3] 周方毅, 詹发民, 姜涛, 等. 一种组合药型罩聚能战斗部[J]. 鱼雷技术, 2012, 20(5): 380-383, 400.
 [4] 廖莎莎, 吴成, 毕世华. 钨铜合金药型罩水介质中侵彻规律的实验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(2): 99-101.
 [5] 王宝林, 徐鹏, 刘炜, 等. 含能材料应用于反跑道战斗部药型罩实验研究[J]. 兵工自动化, 2019, 38(8): 19-20, 29.
 [6] MEHMANNAVAZ H, LIAGHAT G, RAHMATI S, et al. Theoretical, numerical and experimental analysis of bimetallic Cu-Al shaped charge's liners and its influence on the penetration depth and the crater diameter of steel targets[J]. The Brazilian Society of Mechanical Sciences And Engineering, 2019, 41(8): 1-10.
 [7] 吴成, 廖莎莎, 孙韬, 等. 钨合金药型罩材料的大破孔聚能战斗部研究[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(9): 760-762, 766.
 [8] 李必红, 李哲雨, 李尚杰, 等. 新型球锥药型罩的数值仿真及试验分析[J]. 测井技术, 2020, 44(5): 516-519.
 [9] 孔繁家, 周春桂, 王志军, 等. 罩顶材料对双锥药型罩成型及侵彻性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44(6): 30-35.
 [10] 张小静, 吴国东, 王志军, 等. 锥罩材料对组合药型罩射流成型的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(3): 39-42.
 [11] 郭腾飞, 李伟兵, 李文彬, 等. 钨罩结构参数对 EFP 成型及侵彻性能的控制[J]. 高压物理学报, 2018, 32(3): 96-103.
 [12] LEE E S, KYOUNG H O, SONG S Y. Penetration of Particulated Shaped Charge Jet into Water[J]. SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1995, 41: 975-981.
 [13] JANZON S G, CHICK M, BUSSEL T J. Penetration and failure of explosive formed penetrators in water[C]//14th International Symposium on Ballistics. Quebec, Canada: Canadian Defence Preparedness Association, 1993: 611-617.
 [14] 曾必强, 姜春兰, 严翰新, 等. 串联攻坚战斗部前级爆轰对随进弹随进影响分析[J]. 兵工学报, 2010, 31(S1): 162-166.