

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.01.002

# 复合材质杆式射流侵彻水下目标的数值模拟<sup>\*</sup>

张春辉<sup>①</sup> 张 斐<sup>①②</sup> 王志军<sup>②</sup> 周春桂<sup>②</sup> 张 磊<sup>①</sup>

①海军研究院(北京,100161)

②中北大学机电工程学院(山西太原,030051)

[摘 要] 为了实现聚能战斗部对水下目标的高效毁伤,在传统聚能战斗部的基础上设计了一种采用不同材料的球缺罩与偏心亚半球形罩组合的聚能战斗部。阐述了复合材质组合式聚能战斗部的结构设计及作用原理,利用有限元软件 AUTODYN 数值模拟了其成型及侵彻水下靶板的过程,并与传统的偏心亚半球缺式和单一材质组合式战斗部的毁伤效果进行了对比。研究表明,复合材质组合式战斗部形成的前级杆式射流侵彻水介质过程中可以为后级杆式射流开辟无耗能通道;在相同炸高下,侵彻相同厚度的水介质与靶板后,与传统杆式射流相比,复合材质杆式射流的动能衰减率最小,剩余动能提升了 28.59%。该复合材质组合式聚能战斗部可以实现对水下目标的高效毁伤。

[关键词] 聚能装药;杆式射流;水中侵彻;数值模拟

[分类号] TJ410

## Numerical Simulation of Composite-material Rod-like Jet Penetrating Underwater Targets

ZHANG Chunhui<sup>①</sup>, ZHANG Fei<sup>①②</sup>, WANG Zhijun<sup>②</sup>, ZHOU Chungui<sup>②</sup>, ZHANG Lei<sup>①</sup>

① Naval Research Academy (Beijing, 100161)

② School of Mechanical Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

[ABSTRACT] In order to achieve efficient destruction of shaped warheads to underwater targets, a composite-material warhead with an eccentric sub-hemispherical liner and spherical liner was modified from the traditional shaped warhead. Structural design and function principle of the combined shaped warhead were introduced. Processes of forming and penetrating the underwater target were simulated by AUTODYN. Damage effects of traditional eccentric sub-hemispherical warheads and single-material combined warhead were compared with the composite-material warhead. The results show that the forward jet formed by composite-material warhead can provide the moving space for the backward jet in the process of penetrating the water medium. Under the same burst height, after penetrating the water medium and the target plate of the same thickness, the residual kinetic energy of composite rod-like jet is 28.59% higher than that of traditional rod-like jet. The designed composite-material shaped charge warhead can effectively damage underwater targets.

[KEYWORDS] shaped charge; rod-like jet; underwater penetration; numerical simulation

## 引言

舰船防护一直是舰船动力学研究的重要课题。随着科技的发展,现代舰船为了防御鱼雷、水雷等水下武器的攻击,一方面其壳体采用高合金材料,另一方面舰船舷侧防护结构采用空舱-液舱-空舱-防御

纵壁等多层板架结构,加强了舰船的防护能力<sup>[1-3]</sup>。传统的爆破战斗部主要靠爆炸产生的冲击波、气泡脉动等破坏效应毁伤舰船,不能有效地毁伤舰船舷侧的多层防护结构。聚能战斗部不仅可以利用其聚能效应侵彻舰船舷侧防护结构,而且形成的侵彻体能够在水介质中为随进战斗部开辟无耗能运动通道,从而实现对舰船的二次毁伤<sup>[4-7]</sup>。因此,聚能战

<sup>\*</sup> 收稿日期:2018-06-29  
基金项目:国家自然科学基金(11572291)  
第一作者:张春辉(1988-),男,工程师,主要从事爆炸力学的研究。E-mail:502773429@qq.com  
通信作者:张斐(1992-),男,硕士,主要从事爆炸力学的研究。E-mail:zhangfei2918@163.com

斗部被广泛地应用于反舰、反潜导弹和鱼雷。

聚能战斗部的药型罩在炸药的作用下获得能量,形成爆炸成型弹丸(EFP)、金属射流(JET)或聚能杆式射流(JPC)侵彻体<sup>[8]</sup>。聚能侵彻体对舰船的毁伤效果一方面取决于侵彻体经一定距离的水介质后的剩余速度与形状,另一方面取决于舰船的防护结构。杨世昌<sup>[9]</sup>设计了变壁厚 EFP 战斗部,通过仿真模拟研究了 EFP 侵彻水介质靶板机理。长径比较小的 EFP 因受到水的阻力较大,速度衰减加快;而长径比较大的 EFP 不利于侵彻靶板。陈冬梅等<sup>[10]</sup>设计了锥形罩、半球形罩、球缺罩战斗部,分别形成了 JET、JPC、EFP 侵彻体。研究表明:射流侵彻体速度最大,但在水介质中速度衰减也最快;同时,射流的药型罩能量利用率低。EFP 速度梯度很小,但在水介质中头部变形严重。JPC 在水介质中速度衰减相对较慢,且形态受影响相对较小。王海福等<sup>[11]</sup>研究了偏心亚半球形罩形成的杆式射流在水下作用的行为。研究表明:选取合适的装药长径比,杆式射流可以产生明显的空腔隧进效应。

现代舰船多采用复合结构,上述传统的聚能战斗部形成的侵彻体对舰船的毁伤效果有限<sup>[12-13]</sup>。因此,需要通过改变药型罩结构设计新型聚能战斗部来提升其对舰船的毁伤效果。基于此,设计了一种铝、铜复合的球缺罩与偏心亚半球形罩组合的聚能战斗部。利用 AUTODYN 数值模拟了其成型及侵彻水下靶板的过程,与传统的偏心亚半球缺式和单一材质组合式战斗部的毁伤效果进行了对比。

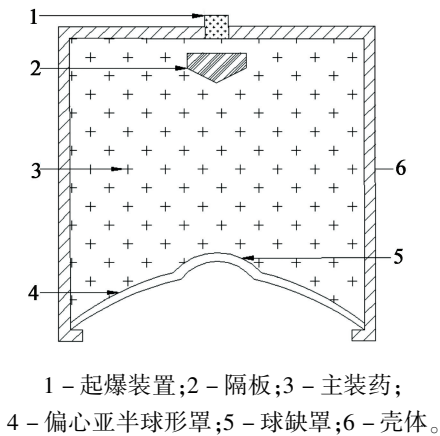
## 1 战斗部结构设计及作用原理

聚能战斗部形成的射流、杆式射流、EFP 各具特点。射流的头部速度高,但速度梯度大,其药型罩的材料利用率仅为 20%<sup>[14]</sup>。EFP 的药型罩材料利用率高且适合远距离攻击,但速度相对较低。杆式射流则兼具射流与 EFP 的优点,既可以保持较高的速度,又可以提升药型罩的材料利用率。李明星等<sup>[15]</sup>研究了 JET、JPC、EFP 侵彻体的水下作用效果,研究表明:在水介质中杆式射流的毁伤效果更好。

传统的鱼雷类聚能战斗部为了提高毁伤威力,通常设计成前、后级串联战斗部。其作用原理是首先引爆前级战斗部,然后通过引信机构延时起爆后级战斗部,前级战斗部主要是侵彻水介质开辟通道,并对目标进行首次毁伤,后级战斗部通过无耗能通道后对目标进行二次毁伤,从而提高了战斗部的毁伤威力。但前、后级串联战斗部往往具有体积大、质

量重的特点,不能满足武器轻量化要求,同时还需要考虑引信延时起爆。

基于以上原因,设计了一种用于侵彻水下目标的球缺罩与偏心亚半球形罩组合的聚能战斗部,主要包括起爆装置、主装药、球缺罩、偏心亚半球形罩、隔板、壳体等,几何结构如图 1 所示。其中球缺罩的材料采用铝,偏心亚半球形罩的材料采用铜。



1 - 起爆装置;2 - 隔板;3 - 主装药;  
4 - 偏心亚半球形罩;5 - 球缺罩;6 - 壳体。

图 1 复合材质组合式战斗部几何示意图

Fig. 1 Geometric diagram of composite-material warhead

复合材质组合式聚能战斗部的作用原理是:主装药在引信的作用下发生爆轰,爆轰波先后压垮球缺罩、偏心亚半球形罩。由于球缺罩的材料铝与偏心亚半球形罩的材料铜相比具有密度小、强度低的特点,因此球缺罩首先形成了速度较高的前级杆式射流,而偏心亚半球形罩则形成了速度较低的后级杆式射流。前级杆式射流率先侵彻水介质,并在其周围形成一定范围的空腔,为后级杆式射流开辟了无耗能通道。因此,后级杆式射流的大部分能量主要消耗于侵彻靶板的过程,从而实现了対高强度防护结构的高效毁伤。

## 2 数值计算

### 2.1 有限元模型

由于包括美国在内的大多数西方国家的潜艇采用单壳体结构<sup>[16]</sup>,因此仿真采用单层靶。即战斗部首先在鱼雷头部导引头的空腔段形成聚能侵彻体,在侵彻一定厚度的水介质后开始侵彻靶板。因此,数值模拟分为两个部分,首先通过 AUTODYN 数值模拟杆式射流的成型过程,然后利用 AUTODYN 中的映射技术将成型后的杆式射流映射后侵彻水介质及靶板。根据复合材质组合式聚能战斗部的结构及作用原理,建立了图 2(a)所示的有限元模型。数值

模拟采用 mm-mg-ms 单位制,其中装药直径为 100 mm,装药长径比为 1;壳体厚 3 mm;前级球缺罩曲率半径为 20 mm,罩顶厚为 3 mm;偏心亚半球形罩内壁曲率半径 100 mm,外壁曲率半径 97 mm,罩顶厚 3 mm;梯形状隔板距装药底端 5 mm,其高为 15 mm,下底 15 mm,上底 10 mm。

为了对比分析复合材质组合式聚能战斗部的毁伤效果,分别建立了图 2(b)、图 2(c)所示的相同尺寸的单一材质组合式战斗部与偏心亚半球缺式战斗部的有限元模型。

图 2(d)是复合材质组合式聚能战斗部形成的杆式射流在炸高为 3 倍装药口径下映射后侵入水介质及靶板的有限元模型。其中,水域尺寸 200 mm × 150 mm,靶板尺寸 20 mm × 200 mm。

数值模拟涉及到靶板、水、空气等固、液、气多物质耦合,因此采用流固耦合的方式进行数值计算。

杆式射流成型过程中,网格变形较大,所以药型罩、炸药、空气、水域均采用欧拉算法,战斗部壳体、靶板采用拉格朗日算法。炸药选用 B 炸药,偏心亚半球形罩选用铜,球缺罩选用铝,壳体与靶板选用 4340 钢,隔板选用橡胶。材料的强度模型与状态方程的参数均选自文献[13]。

2.2 射流成型结果及分析

图 3 是偏心亚半球缺式战斗部、单一材质组合式战斗部、复合材质组合式战斗部在炸高为 3 倍装药口径下的成型结果;表 1 是该炸高下 3 种杆式射流的性能参数。

从图 3 可以看出,偏心亚半球缺式战斗部形成的杆式射流头部直径最大、连续性最好;单一材质组合式战斗部形成的杆式射流尾部出现断裂;复合材质组合式战斗部形成的杆式射流由于存在较大的速度梯度,导致其形成了前、后级分离的杆式射流,且

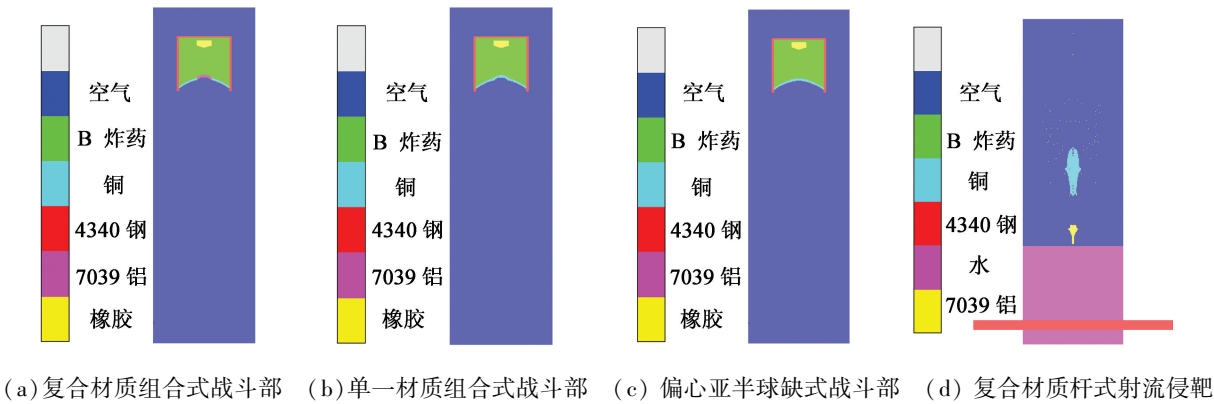


图 2 有限元模型  
Fig. 2 Finite element models

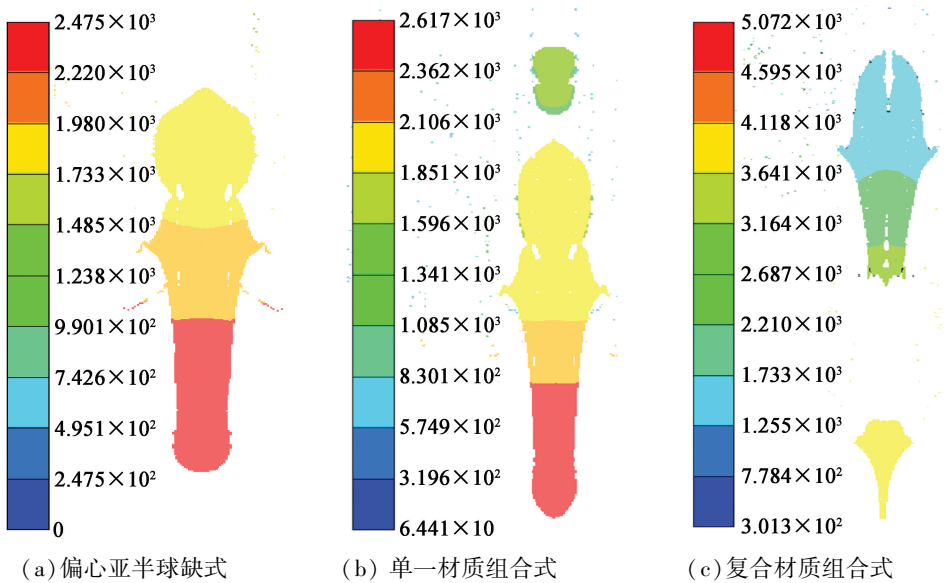


图 3 3 种战斗部形成杆式射流的数值模拟结果

Fig. 3 Numerical simulation results of three kinds of warheads forming rod-like jet

表 1 3 种杆式射流性能参数

Tab. 1 Performance parameters of three kinds of rod-like jet				
战斗部类型	头部速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	尾部速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	头尾速度差/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	头部直径/ mm
偏心亚半球缺式	2 472.9	824.1	1 648.8	14.8
单一材质组合式	2 579.5	1 423.9	1 155.6	12.9
复合材质组合式	3 633.2	1 603.7	2 029.5	3.2

断裂位置仅出现在两种材料的分界处,符合预期目标。结合图 3 与表 1 可以得出,复合材质组合式战斗部形成的杆式射流头、尾部速度均高于其他两种战斗部形成的杆式射流的速度;其头部直径仅为3.2 mm,明显小于其他杆式射流的头部直径。文献[10]的研究表明,射流头部直径较大会增加其在水介质中运动的阻力,加快速度衰减;较小的头部直径则可以降低杆式射流在水中运动受到的阻力,延缓

速度衰减。因此,复合材质组合式战斗部形成的头部直径较小的高速杆式射流更适合在水介质中开辟空腔,较大的尾部速度则可以提升战斗部的二次毁伤威力。

2.3 射流水下侵靶结果及分析

图 4 是复合材质组合式、单一材质组合式、偏心亚半球缺式 3 种战斗部形成的杆式射流侵彻水介质及靶板的典型过程。从图 4 中看出,3 种战斗部形成的杆式射流头部率先与水作用后出现镦粗,并在其周围形成一定尺寸的空腔,随着杆式射流与水的进一步作用,空腔面积逐渐增大。随后,杆式射流头部开始与靶板接触,高速撞击靶板的瞬间形成的冲击波传向靶板内部,在冲击波与杆式射流的共同作用下,靶板与射流接触区域的材料发生破坏、变形,继而形成弹坑。从图 4(a)中可以明显看出,复合材质组合式战斗部形成的前级杆式射流侵彻水介质后形成的空腔为后级杆式射流开辟了运动通道,后级杆式射流以较高的速度开始侵彻靶板。从图 4(b)与图 4(c)中可以看出,单一材质组合式与偏心亚半

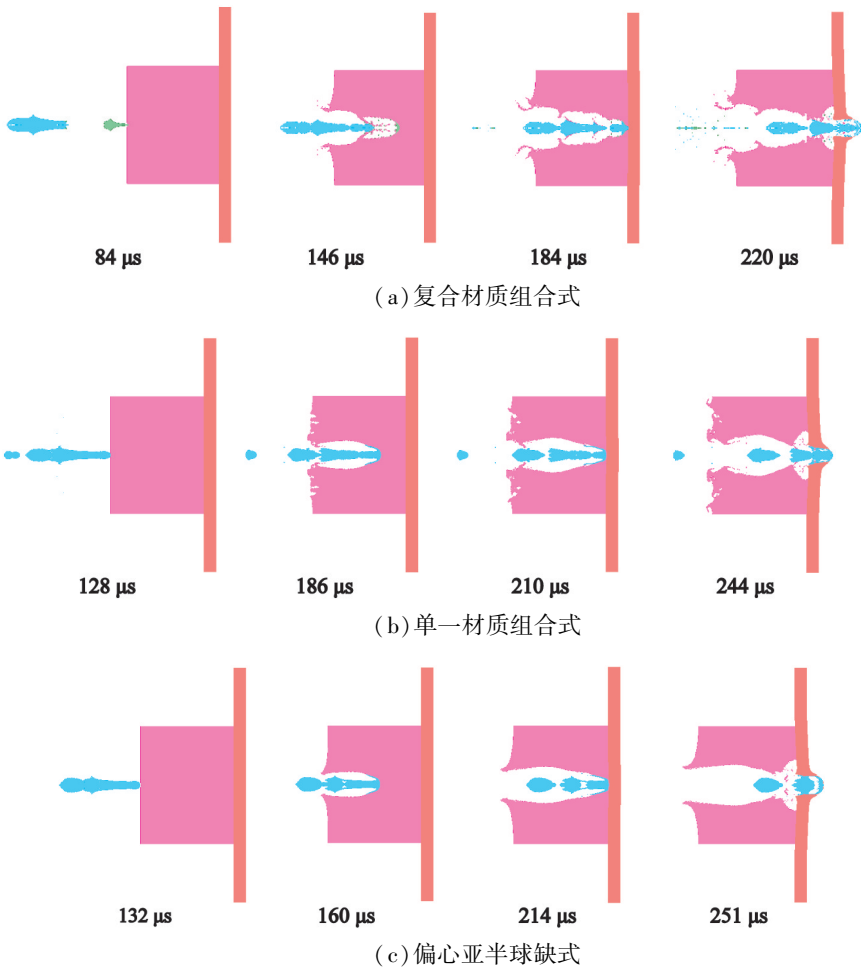


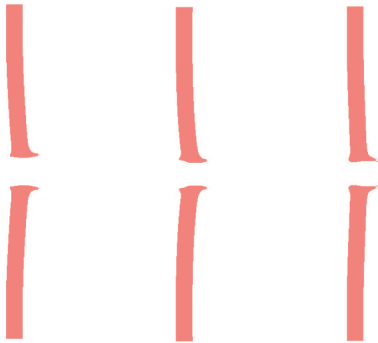
图 4 3 种杆式射流侵彻水下靶板的过程

Fig. 4 Penetrating process of three kinds of rod-like jet to underwater targets



球缺式战斗部形成的杆式射流均是直接侵彻水介质,在水介质的阻力及侵蚀作用下,杆式射流出现断裂,且质量逐渐下降,对靶板的侵彻能力显著降低。

偏心亚半球缺式、单一材质组合式、复合材质组合式 3 种战斗部形成的杆式射流侵彻相同厚度的水介质与靶板后,靶板的破孔情况如图 5 所示,表 2 记录了靶板的破孔直径。结合图 5 与表 2 可以发现,侵彻相同厚度水介质后,3 种杆式射流侵彻靶板的入口与出口孔径大小趋于一致。偏心亚半球缺式战斗部形成的杆式射流头部直径最大,侵彻水介质与靶板过程中,杆式射流头部墩粗,射流头部与靶板接触区域出现射流堆积现象,导致部分杆式射流作用于靶板孔径的径向,因此其侵彻靶板后形成的孔径最大。而复合材质组合式战斗部形成的杆式射流侵彻靶板后形成的孔径最小,与最大孔径相差 18.73%。



(a) 偏心亚半球缺式 (b) 单一材质组合式 (c) 复合材质组合式  
图 5 3 种杆式射流的侵靶效果

Fig. 5 Target penetration effects of three kinds of rod-like jet

表 2 3 种杆式铜射流侵彻靶板的孔径  
Tab.2 Aperture of three kinds of rod-like copper jet penetrating target plate

战斗部类型	mm	
	入孔	出孔
偏心亚半球缺式	38.22	38.22
单一材质组合式	36.19	36.19
复合材质组合式	32.81	32.81

2.4 射流侵彻水下目标的规律分析

在炸高为 3 倍装药口径时,3 种战斗部形成的杆式射流侵彻水介质过程中头部速度随侵彻深度的变化情况如图 6 所示。从图 6 中可知,单一材质组合式战斗部与偏心亚半球缺式战斗部形成的杆式射流侵彻水介质过程中速度的衰减规律相似。侵彻深度在 0 ~ 20 mm 段内,杆式射流头部速度迅速衰减;随着侵彻深度的增加,杆式射流受到的阻力随着周

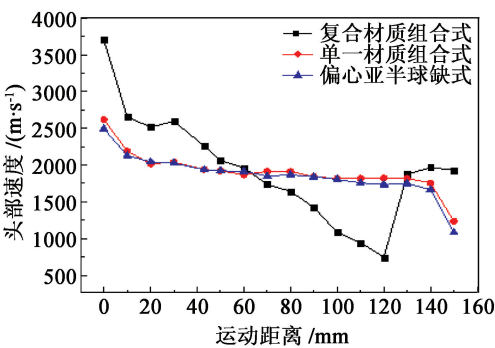


图 6 杆式射流头部速度随运动距离的变化  
Fig. 6 Variation of head velocity with distance of movement

围空腔面积的增大而逐渐减小,杆式射流速度的衰减逐渐减缓并趋于稳定。130 ~ 150 mm 段内,杆式射流头部速度的衰减再次加快。这是由于杆式射流侵彻水介质过程中会形成速度远大于杆式射流速度的冲击波,冲击波率先从水介质中传入靶板,同时在水介质与靶板的分界面处产生反射,反射波反向作用于杆式射流,因此射流头部速度迅速衰减。

复合材质组合式战斗部形成的杆式射流头部速度明显大于另外两种战斗部形成的杆式射流,因此,在侵彻水介质过程中,头部速度的衰减也明显增快。当侵彻深度达到 120 mm 时,复合材质组合式战斗部形成的杆式射流头部速度降到最小,表明前级杆式射流侵彻水介质过程基本结束,剩余速度基本丧失了侵彻能力;此后,射流头部速度大幅跃升,表明后级杆式射流开始侵彻水介质,这是由于后级杆式射流一直在前级射流侵彻水介质后形成的空腔中保持低阻运动,因此头部速度出现跃升。

在炸高为 3 倍装药口径时,偏心亚半球缺式、单一材质组合式、复合材质组合式 3 种战斗部形成的杆式铜射流侵彻水介质与靶板过程中动能的衰减情况如表 3 所示。杆式射流侵彻水介质后,剩余动能的大小决定了其对靶板的毁伤程度。从表 3 中可知,单一材质组合式战斗部形成的杆式铜射流侵彻水介质过程中动能的衰减率最大;偏心亚半球缺式战斗部形成的杆式铜射流衰减率次之;复合材质组合式战斗部形成的杆式铜射流衰减率仅为 9.17%,这是由于其始终在前级射流开辟的无耗能通道中保持低阻运动。3 种战斗部形成的杆式射流侵彻相同厚度的水介质与靶板后,复合材质组合式战斗部形成的杆式铜射流的靶前动能与靶后动能均为最大,靶板中动能衰减率最小,与单一材质组合式战斗部形成的杆式射流相比,靶后剩余动能提高了 28.59%。因此,复合材质组合式战斗部侵彻水下目

表3 3种杆式铜射流动能衰减情况					
Tab.3 Attenuation of kinetic energy of three kinds of rod-like copper jet					
战斗部类型	入水前动能/kJ	靶前动能/kJ	靶后动能/kJ	水介质中动能衰减率/%	靶板中动能衰减率/%
偏心亚半球缺式	631.52	521.54	423.29	17.42	18.84
单一材质组合式	595.38	425.13	357.51	28.59	15.91
复合材质组合式	613.70	557.43	500.61	9.17	10.19

标的能力最强。

2.5 数值仿真精度验证

以文献[11]开展的实验研究为例,验证本研究中数值方法的可靠性。图7是根据本研究中的建模方法及参数建立的数值仿真模型,其中,装药口径54 mm,装药高度83 mm,水介质厚度为435 mm,靶板厚度50 mm,炸高为220 mm,上述参数与文献[11]中实验的相关参数均保持一致。数值仿真结果与文献[11]中的实验结果对比如表4所示,从表4中可以看出,两者吻合较好,证明数值仿真方法可靠,参数选取合理。

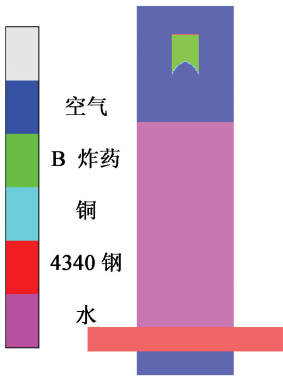


图7 验证数值仿真精度的有限元模型  
Fig.7 Finite element model for verifying the accuracy of numerical simulation

表4 数值模拟与实验结果比较

Tab.4 Comparison between numerical simulation and test results

类型	炸高	浸水深度	侵靶深度	mm
				侵靶孔径
实验结果	220	435	38	18
仿真结果	220	435	42	19

综上所述,设计的球缺罩与偏心亚半球形罩组合的聚能战斗部可以形成前、后级分离的杆式射流,前级射流侵彻水介质的同时在其周围形成了空腔,为后级射流提供了无耗能运动通道,随进的后级射流能够有效地毁伤后续目标靶板。相较于传统的偏心亚半球缺式、单一材质组合式战斗部和两级串联

战斗部,复合材质组合式战斗部既可以满足武器轻量化需求,又可以实现对水下目标的高效毁伤。

3 结论

设计了一种球缺罩与偏心亚半球形罩组合的聚能战斗部,采用数值仿真的方法模拟了其成型及侵彻水下目标靶板的过程,并与偏心亚半球缺式、单一材质组合式战斗部的毁伤效果进行对比,得出:

- 1)设计的3种战斗部形成的杆式射流侵彻水介质时,速度衰减程度呈先增大后减小再增大的趋势,且入水初速越大,在水介质中速度衰减越快;
- 2)3种战斗部形成的杆式射流在炸高为3倍装药口径下侵彻相同厚度的水介质与靶板后,复合材质组合式战斗部形成的杆式射流在水介质与靶板中动能的衰减率均为最小,与单一材质组合式战斗部相比,剩余动能提高了28.59%。
- 3)复合材质组合式战斗部可以形成前、后级分离的杆式射流;前级射流侵彻水介质后形成的空腔可以为后级射流提供无耗能通道,其毁伤水下目标的能力显著优于偏心亚半球缺式、单一材质组合式战斗部形成的杆式射流。

参 考 文 献

[1] 姚熊亮. 舰船结构振动冲击与噪声[M]. 北京:国防工业出版社,2007.

[2] 王团盟,向春. 鱼雷聚能战斗部 EFP 侵彻潜艇结构模拟靶数值模拟[J]. 鱼雷技术,2008,16(1):44-47. WANG T M, XIANG C. Numerical simulation of penetrating simulant targets of submarine structure by explosively-formed projectile of torpedo shaped charge warhead [J]. Torpedo Technology,2008,16(1):44-47.

[3] 杨莉,张庆明,时党勇. 爆炸成型模拟弹丸对水介质侵彻的数值仿真[J]. 弹箭与制导学报,2009,29(2):117-119. YANG L, ZHANG Q M, SHI D Y. Numerical simulation for the penetration of explosively formed projectile into water[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and

- Guidance, 2009, 29(2): 117-119.
- [4] 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, 13(2): 23-27.  
LING R H, QIAN L X, TANG P, et al. Target damage study of shaped-charge warhead of antisubmarine torpedo[J]. Journal of Ballistics, 2001, 13(2): 23-27.
- [5] 罗健. 串联聚能装药在水下弹药中的应用[J]. 弹箭技术, 1996(4): 38-44.
- [6] 步相东, 王团盟. 鱼雷聚能战斗部自锻弹丸水中运动特性仿真研究[J]. 鱼雷技术, 2006, 14(3): 44-47.  
BU X D, WANG T M. Simulation study on kinematic characteristic of explosively formed projectile (EFP) in the water for torpedo shaped charge warhead[J]. Torpedo Technology, 2006, 14(3): 44-47.
- [7] 程素秋, 陈高杰, 赵红光. 聚能战斗部对双层靶板结构毁伤的数值模拟研究[J]. 中国舰船研究, 2013, 8(2): 53-57.  
CHENG S Q, CHEN G J, ZHAO H G. Numerical damage analysis of shaped charge warheads on double-deck target plates[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2013, 8(2): 53-57.
- [8] 李向东, 钱建平, 曹兵, 等. 弹药概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [9] 杨世昌. EFP 侵彻水介质靶板机理仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [10] 陈冬梅, 陈智刚, 侯秀成, 等. 三类聚能侵彻体鱼雷战斗部对目标毁伤数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(2): 110-113.  
CHEN D M, CHEN Z G, HOU X C, et al. The simulation on target damage of three shaped-charge penetrators torpedo warheads[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(2): 110-113.
- [11] 王海福, 江增荣, 俞为民, 等. 杆式射流装药水下作用行为研究[J]. 北京理工大学报, 2006, 26(3): 189-192.  
WANG H F, JIANG Z R, YU W M, et al. Behavior of jetting penetrator charge operating underwater[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(3): 189-192.
- [12] 周方毅, 黄雪峰, 詹发民, 等. 一种双球缺组合药型罩聚能鱼雷战斗部研究[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(3): 278-281, 287.  
ZHOU F Y, HUANG X F, ZHAN F M, et al. A shaped charge warhead with two spherical combined liners for torpedo[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2017, 25(3): 278-281, 287.
- [13] 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.  
ZHOU F Y, ZHAN F M, JIANG T, et al. An idea about shaped charge warhead with combined charge liner for torpedo[J]. Torpedo Technology, 2012, 20(5): 380-383, 400.
- [14] 许世昌, 何多勇, 何源. 射杆分离模式的双层药型罩射流成型仿真[J]. 计算机仿真, 2015, 32(8): 1-5, 72.  
XU S C, HE D Y, HE Y. Research on effective material of double-layered shaped charge liner[J]. Computer Simulation, 2015, 32(8): 1-5, 72.
- [15] 李明星, 王志军, 伊建亚, 等. 不同聚能装药水下作用效果的对比分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2017, 40(5): 95-99.  
LI M X, WANG Z J, YI J Y, et al. Comparative analysis of underwater effect for different shaped charge[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2017, 40(5): 95-99.
- [16] 汪玉, 姚耀中. 世界海军潜艇[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 120-130.

(上接第7页)

- esters [J]. Russian Journal of Organic Chemistry, 2004, 40(7):1062-1063.
- [51] STEPANOV R S, KRUGLYAKOVA L A, ASTAKHOV A M. Effect of the structure of 2,2,2-Trinitroethyl-N-nitroamines on the rate of their thermal decomposition [J]. Russian Journal of Organic Chemistry, 2001, 37(12):1793.
- [52] KLAPÖTKE T M, KRUMM B, SCHARF R. From amino acids to high-energy dense oxidizers: polynitro materials derived from  $\beta$ -alanine and *L*-aspartic acid [J]. Journal of Inorganic and General Chemistry, 2016, 642
- [53] KLAPÖTKE T M, KRUMM B, SCHARF R. *N*-Nitrosarcosine: an economic precursor for the synthesis of new energetic materials [J]. Chemistry: An Asian Journal, 2016, 11(21): 3134-3144.
- [54] ABD-ELGHANY M, KLAPÖTKE T M, ELBEIH A. Investigation of 2,2,2-trinitroethylnitrocarbamate as a high energy dense oxidizer and its mixture with nitrocellulose (thermal behavior and decomposition kinetics) [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2017, 128: 397-404.