

文章编号: 1006-9941(2017)06-0459-07

EFP 水中飞行特性及侵彻间隔靶的仿真与试验研究

王雅君, 李伟兵, 王晓鸣, 李文彬

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 针对爆炸成型弹丸(EFP)战斗部在水下弹药的应用问题,利用 LS-DYNA 有限元软件,仿真研究了 EFP 在水中的速度衰减与质量损失规律及对不同距离的间隔靶侵彻规律,并通过高速摄影试验进行了试验验证。结果表明,EFP 入水后形态极不稳定,质量急剧减小甚至碎裂,随着在水中飞行距离的增加质量逐渐减少至初始质量的 1/3 ~ 1/5, EFP 在水中速度先以线性下降后呈指数规律衰减,且 EFP 飞行 2.5 倍装药直径距离可贯穿 5 mm 靶板,但是 EFP 飞行超过 5 倍装药直径时已不具有侵彻能力。

关键词: 爆炸成型弹丸(EFP); 水介质; 侵彻; 数值模拟; 飞行特性

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.06.003

1 引言

现代水面舰船甚至潜艇其防护能力均大幅提高,传统爆破式弹药面临严峻的挑战,而经验表明,只靠增大药量并不是解决爆炸威力的根本途径,为增大水中兵器战斗部毁伤能力,国内外科科研机构开始探索聚能装药在水下弹药中的应用问题^[1]。针对聚能装药在水中兵器的应用,国外, Saroha D R^[2-3]、Yaziv D^[4]、Max Peters^[5]、Xing Shi-long 等^[6]将多通道闪光摄影仪、X 光与高速摄影等试验手段与数值模拟方法相结合,研究了射流对含水夹层靶板的侵彻过程,并由此得到射流侵彻水介质时伴有流体惯性作用,较长杆体具有更强的侵彻能力,但射流在水中衰减较快且易断裂,故炸高较大时难以在水中实现有效侵彻。国内,罗建^[7]、李成兵^[8]、裴明敬^[9]、史进伟等^[10]相继研究了射流、串联射流及杆式射流对水夹层间隔靶的侵彻过程,结合准定常侵彻理论和数学归纳法建立了射流侵彻水介质夹层间隔靶理论模型。但是上述研究表明,射流在水中破孔小,且适应性较差。考虑爆炸成型弹丸(Explosively Formed Projectile, EFP)抗干扰能力

强,且后效好,破孔大,有利于对靶板的破坏,针对 EFP 的研究随即展开。王海福等^[11-12]通过数值及试验验证研究了药型罩参数对聚能装药水下作用的影响,提出罩形是影响聚能装药水下特性最重要的影响因素,并利用数值仿真手段进一步尝试了双层 EFP 在水中的飞行侵彻过程。杨莉^[13]、曹兵等^[14]进一步研究了 EFP 的水下作用特性,发现水中 EFP 伴有的冲击波和弹道波,对目标靶的破坏效果明显增强。虽然目前对 EFP 水中飞行及靶板侵彻已开展一定研究,但由于水介质的阻尼影响,EFP 在水中的作用规律与在空气中的飞行及侵彻规律有何区别仍有待深入研究。

为此,本研究利用数值仿真软件 LS-DYNA,通过 EFP 等效模型研究 EFP 在水中的作用规律,探索了 EFP 在水中的速度衰减与质量损失规律,并设计 EFP 水中不同距离下侵彻间隔靶的方案,试验与仿真研究了 EFP 水中对间隔靶的侵彻规律。

2 仿真模型与研究方案

2.1 EFP 成型计算模型

综合考虑仿真精度及计算时间等因素,本研究中飞行及侵彻仿真分两步完成,首先单独计算 EFP 的成型,得到等效 EFP 模型;随后赋予等效 EFP 初始速度对水介质进行侵彻,建立 EFP 水中飞行及侵彻间隔靶的数值仿真模型,仿真计算 EFP 水中作用规律及对间隔靶的侵彻规律。

本研究药型罩采用弧锥结合形结构,装药直径为 40 mm,装药高度取 1.0CD (Charge Diameters)。装

收稿日期: 2016-10-13; 修回日期: 2016-12-07

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(SJZZ16_0067),江苏省“青蓝工程”资助

作者简介: 王雅君(1992-),男,硕士研究生,主要从事弹丸高效毁伤与终点效应研究。e-mail: njustwyajun@163.com

通信联系人: 李伟兵(1982-),男,副研究员,博士生导师,主要从事弹丸的终点效应与目标毁伤技术研究。e-mail: njustlwb@163.com

药采用密度 $1.69 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的 8701 炸药,起爆方式为
中心点爆,EFP 成型装药计算模型如图 1 所示。

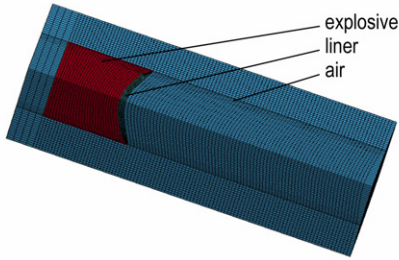


图 1 EFP 成型装药计算模型图

Fig.1 Calculation model of EFP forming charge

考虑到毁伤元成型过程中网格的畸变问题,仿真
中对炸药、药型罩、空气应用 ALE 算法^[15]。仿真中各
部分的材料模型参数及计算模型见表 1。

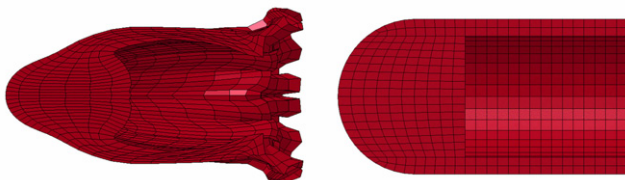
表 1 材料参数及计算模型^[16]

Table 1 Material parameters and calumniation models^[16]

section	materials	density /g · cm ⁻³	strength model	equation of state
explosive	8701	1.69	High_explosive_burn	JWL
liner	Cu	8.96	Johnson_cook	Gruneisen
air	-	1.29×10^{-3}	Null	Gruneisen

2.2 EFP 等效模型及水中作用计算方案

考虑空气中 EFP 成型变化较小,且 EFP 水中侵彻
间隔靶过程数值仿真计算量较大,为解决网格畸变等
原因造成的计算精度下降的问题,将成型后的 EFP 进
行简化,建立等效模型模拟 EFP 水中侵彻间隔靶过程,
EFP 成型仿真计算结果及相应的 EFP 等效模型如图 2
所示。由于本研究成型装药结构所形成的 EFP 在实际
成型过程中尾翼易发生断裂脱离主体的现象,故 EFP
等效模型中不考虑裙尾结构。EFP 等效模型选择密度
 $8.96 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的紫铜,根据 EFP 具体成型条件,对部
分参数进行修正,得到 EFP 等效模型参数为半径
7.3 mm,全长 27.3 mm,尾翼内径 5.7 mm,长 15.3 mm,
飞行速度 $1700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。



a. simulation generated image b. equivalent model

图 2 EFP 成型仿真计算结果与等效模型

Fig.2 Simulated results of EFP formation and the equivalent model

EFP 水中飞行及侵彻间隔靶数值仿真模型如图 3
所示,图中 L_1 、 L_2 分别为前后两靶板距 EFP 入水处距离。
为了进一步研究 EFP 水下对不同距离下间隔靶的侵彻
情况,设计了 5 种不同距离下 EFP 侵彻间隔靶的方案,
其中方案 1、2、3 为间隔靶布置;考虑随距离的增长 EFP
侵彻能力下降明显,方案 4、5 为单靶板布置。方案中靶
板厚度均为 5 mm,采用密度 $7.83 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的 45 钢,
方案设置见表 2。

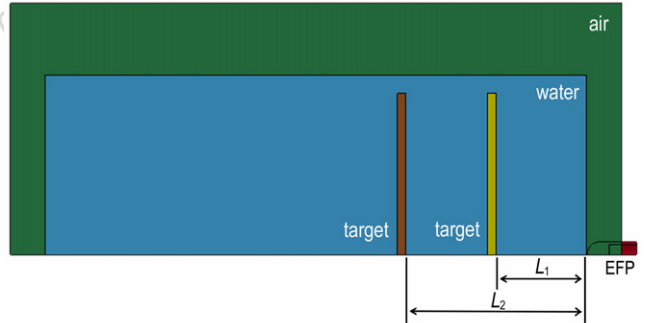


图 3 水中飞行及 EFP 侵彻仿真计算模型

Fig.3 Simulation model of the flight and penetration of EFP in water

表 2 数值仿真方案

Table 2 Numerical simulation scheme

test	1	2	3	4	5
L_1 /mm	1.25CD	2.50CD	3.75CD	5.00CD	6.25CD
L_2 /mm	2.50CD	3.75CD	5.00CD	-	-

仿真模型为 1/4 三维数值计算模型,选用实体
solid164 单元,采用 ALE 耦合算法^[15]。等效弹丸及靶
板均采用拉格朗日网格建模,材料本构关系选用
JOHNSON_COOK 模型;水介质及空气采用欧拉网
格建模,四周为无反射扰动的透射传播边界,空物质材
料本构模型,状态方程采用 GRUNEISEN 模型,状态方
程形式如下:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \gamma_0 / 2) \mu - (\alpha / 2) \mu^2]}{\left[1 - (s_1 - 1) \mu - s_2 \frac{\mu^2}{\mu - 1} - s_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E_0$$

式中, p 为压力, GPa; C 为冲击波速度-质点速度曲线
的截距, $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; γ_0 为 GRUNEISEN 常数; α 为 γ_0 和
 μ 的体积修正量; E_0 为单位体积初始能量, GPa; s_1 ,
 s_2 , s_3 , 为材料特性参数; 体积变化率 $\mu = \rho / \rho_0 - 1$, ρ , ρ_0
分别为材料密度、材料初始密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。材料具体
参数见表 3。

表 3 材料参数

Table 3 Material parameters

materials	ρ /g · cm ⁻³	C /km · s ⁻¹	s_1	s_2	s_3	γ_0	α	E_0 /GPa
air	1.29×10 ⁻³	0.344	0	0	0	1.4	0	0
water	0.998	1.484	1.752	0	0	0.28	0	0

3 仿真计算结果及分析

3.1 EFP 水中速度衰减规律

EFP 的速度和质量是影响 EFP 水中侵彻能力的重要参数。根据 2.2 节数值仿真模型计算无靶板条件下 EFP 水中侵彻过程,得到如图 4 所示 EFP 水中侵彻过程。

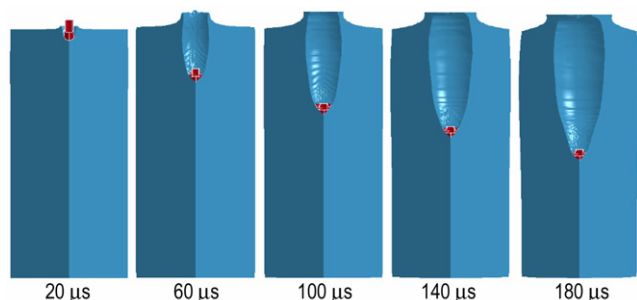


图 4 EFP 水中侵彻过程

Fig. 4 The penetration process of EFP in water

EFP 最初与水接触时,首先会产生对水的撞击作用。此时将产生一个短暂的、以近似于水中声速辐射出去的高速激波^[17]。由于撞击持续时间短,撞击力对其水中弹道影响较小,但仍会改变 EFP 的速度并产生喷溅。根据图 4 所示 EFP 侵彻水介质过程可知,撞击后,水从弹体流开,空泡形成,产生空腔现象。空泡在水面处与大气相通,随着 EFP 沿着轨道前进,空泡进一步加长,气体填充到弹体后面的空带里,形成一个空泡,其中部分是气体,部分是水蒸气。由于 EFP 前进时,仅头部与水接触,尾部未与空泡壁发生作用,EFP 水中弹道近似于空中轨道延长线的直线。根据仿真结果标定不同距离下 EFP 的飞行速度,可获得 EFP 水中速度变化曲线,结果如图 5 所示。

由图 5 可见,EFP 与水介质产生的撞击力对 EFP 的速度影响较大,EFP 在水介质中速度衰减明显。EFP 刚进入水中速度则由 1700 m · s⁻¹ 迅速减少至 1570 m · s⁻¹。在入水仅 2CD 的距离内,因头部形状变化显著,EFP 的速度随即下降至 1070 m · s⁻¹,降幅达到 500 m · s⁻¹,且速度衰减具有一定线性规律。而随着 EFP 形状逐渐趋于

稳定,EFP 速度衰减过程呈现指数规律,速度趋近于 400 m · s⁻¹。此后随着速度持续下降,EFP 基本不具备水中侵彻能力。

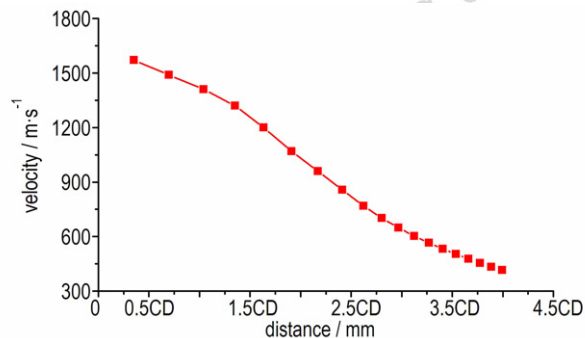


图 5 EFP 水中不同距离下的速度变化曲线

Fig. 5 The change curve of EFP velocity at different distance in water

3.2 EFP 水中质量变化规律

EFP 外形和质量的变化对 EFP 水中弹道及速度衰减规律均会产生明显的影响。对 EFP 水中侵彻过程进行仿真计算,得到 EFP 在侵彻水介质过程中的变形情况,结果如图 6 所示。

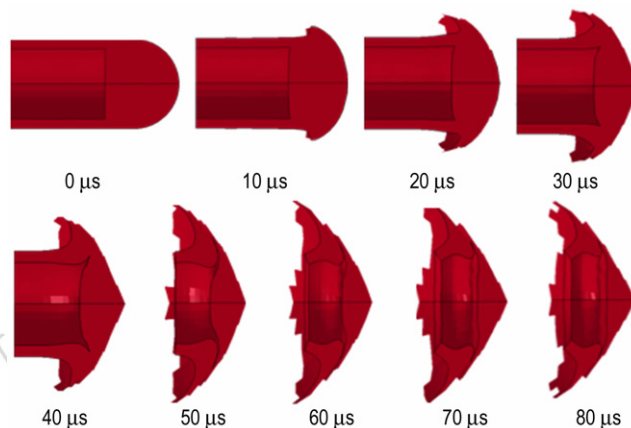


图 6 EFP 侵彻水介质过程形状变化

Fig. 6 The shaped change of EFP in the process of penetrating into water medium

由图 6 可知,EFP 侵彻水介质时变形损耗明显。EFP 入水过程,由于持续时间短暂,流体的粘性、重力及表面张力均可忽略。但 EFP 侵彻水介质时,受水的密度、可压缩性和粘滞性影响较大。EFP 侵入水介质后,受到惯性阻力、压差阻力、粘滞阻力等影响,发生明显磨损变形,导致 EFP 质量降低、形状改变,并直接影响到 EFP 的侵彻能力。根据仿真结果标定不同距离下 EFP 的剩余质量,得到 EFP 水中质量变化曲线,结果如

图 7 所示。

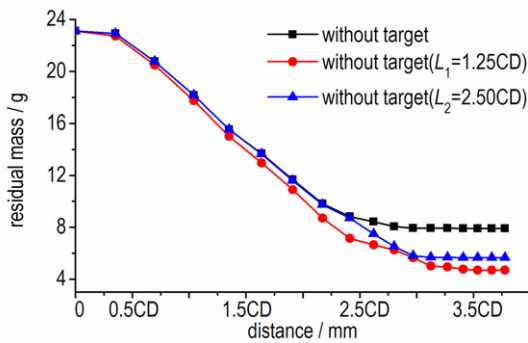


图 7 EFP 水中不同距离下的质量变化曲线

Fig.7 The change curves of EFP mass at different distance in water

表 4 EFP 水中侵彻靶板仿真结果

Table 4 Simulated results of penetrating targets of EFP in water

test	target 1		target 2		
	L_1 /mm	results	L_2 /mm	results	
1	1.25CD	perforation	$d \approx 0.8CD$	2.50CD	concavity $P \approx 0.9CD$
2	2.50CD	perforation	$d \approx 0.5CD$	3.75CD	fail to contact -
3	3.75CD	concavity	$P \approx 0.7CD$	5.00CD	fail to contact -
4	5.00CD	concavity	$P \approx 0.5CD$	-	-
5	6.25CD	fail to contact	-	-	-

Note: d is the penetration diameter, and P is the penetration depth.

由表 4 可见, EFP 可轻松穿过 1.25CD 处前靶板并形成直径约 0.8CD 的弹孔, 并且在 2.5CD 处后靶板上侵彻得到一个深约 0.9CD 的弹坑。在飞行 2.5CD 的距离后, EFP 仍可穿透前靶板形成直径约 0.5CD 的弹孔, 但对后靶板侵彻效果不明显, 表明 EFP 穿透前靶板后剩余质量与剩余速度都大幅下降。EFP 到达 3.75CD 处靶板时, 虽然仍具有一定侵彻能力但不能穿透靶板, 弹坑深度约 0.7CD。随着飞行距离的增加, EFP 侵彻能力进一步下降, 对置于 5CD 处的靶板, 仅能造成一个深度不足 0.5CD 的弹坑; 对置于 6.25CD 处的靶板, 未能造成损伤。

根据仿真结果, 该结构成型装药形成的 EFP 在水中飞行 1.25CD 距离时, 可直接贯穿前靶板并将后靶板冲塞变形; 在水中飞行 2.5CD 距离时, 仍可穿透前靶板; 在水中飞行 3.75CD 时, 即难以穿透薄靶板; 而在水中飞行超过 5CD 时 EFP 已不具有侵彻能力。

4 试验验证

4.1 试验设计

对应于表 2 所示间隔板布置方案, 设计 5 组 EFP

由图 7 可见, EFP 入水后质量急剧减小, 随着水中飞行距离的增加, 运动速度减慢, 剩余质量进一步减小, 侵彻能力随之减弱。EFP 在水中运动距离达到 2CD 时, 剩余质量已不足初始质量一半, 最后基本稳定在初始质量的 1/3。当水中设置靶板时, 由于靶板对冲击波的影响, EFP 质量损失更为明显: 2.5CD 距离处设置靶板, 最后剩余质量约为初始质量的 1/4; 1.25CD 距离处设置靶板, 最后剩余质量仅为初始质量的 1/5。

3.3 EFP 水中侵彻间隔靶规律

为研究 EFP 水中侵彻间隔靶规律, 对表 2 方案进行仿真, 结果见表 4。

水中飞行及侵彻试验, 对仿真结果进行验证, 具体参数与仿真保持一致。距 EFP 战斗部水平距离 0.5 m 处, 布置参数为 500 mm×500 mm×300 mm 的水缸, 并注水。合理布设高速摄影仪器, 拍摄 EFP 穿越水箱及侵彻靶板的作用过程, 曝光速度设置为 50000 fps, 即每张照片相隔时间为 20 μ s, 试验场地布置如图 8 所示。

4.2 EFP 水中运动过程研究

利用高速摄影技术对 EFP 水中运动过程进行试验验证。考虑方案 3 中 EFP 具有较长运动距离, 且仍具有一定侵彻能力, 本研究选取方案 3 作为典型方案进行 EFP 水中运动过程及速度运动规律验证。为方便高速摄影仪拍摄, 将两条胶带贴于水箱玻璃壁表面以标定 EFP 水中飞行位置。EFP 水中飞行侵彻图像如图 9 所示。由图 9 可知, 侵彻过程会形成含有气泡和颗粒的径向水腔, 这一点与仿真结果完全一致。EFP 撞击水介质, 水从弹体流开, 形成空腔现象。同时, 由于 EFP 的高温及流体状态属性, 以及水的压缩性, 高速侵彻过程中 EFP 会形成很大的轴向压应力, 并导致其高速径向变形甚至碎裂。试验结果表明水中冲击波及空腔对靶板的破坏效应起着重要作用, 并在一定程度上影响了 EFP 的侵彻效果。

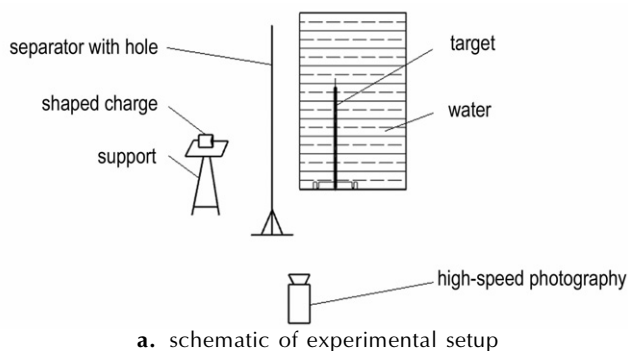


图 8 EFP 水中侵彻试验布置图

Fig. 8 Photographs of the high-speed photography text stand

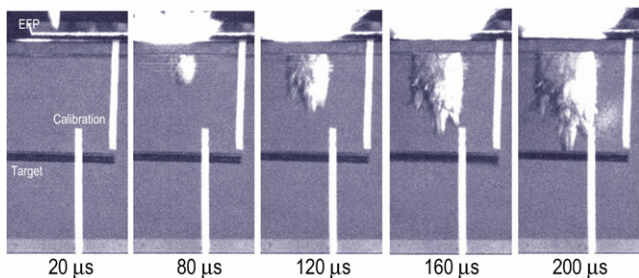
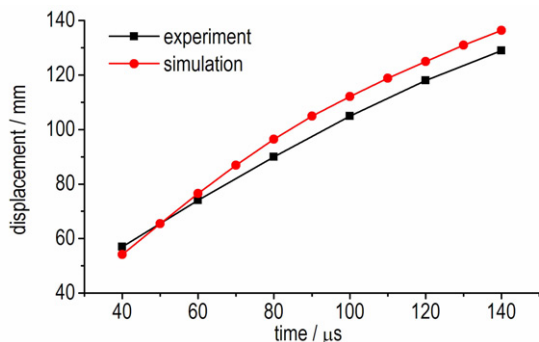


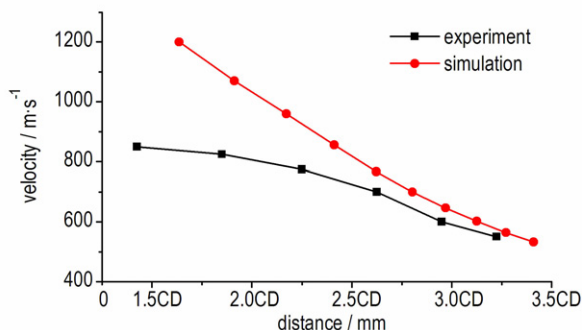
图 9 高速摄影下 EFP 水中飞行图像

Fig. 9 High-speed photographic images of EFP traveling in water

该成型装药形成的 EFP 在空气中飞行速度为 $1700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,观察高速摄影图像,从 EFP 进入水箱开始计时,记录每张照片中 EFP 位置,分别作时间-位移与位移-速度曲线,对比数值仿真结果,得到对比曲线如图 10 所示。由图 10 可见,时间-位移对比曲线趋势一致,最大误差为 5.7%;位移-速度对比曲线前半段由于试验中 EFP 入水过程复杂,速度受钢制水箱壁及冲击波影响较大,而数值仿真为理想状态且无钢制水箱壁,故误差较大,2.25CD 处误差达到 10.5%;随着冲击波影响逐渐减小,误差减小,随后曲线逐渐趋于一致,而 3.25CD 处误差仅 3.4%,故可以认为吻合程度较好。



a. change curves of displacement at different time



b. change curves of velocity at different distance

图 10 EFP 水中飞行试验仿真对比曲线

Fig. 10 Comparative curves of the simulation and experiment of EFP traveling in water

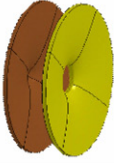
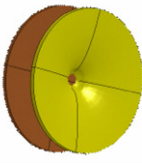
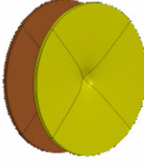
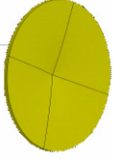
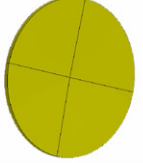





4.3 EFP 水中侵彻仿真与试验对比

对 5 组验证试验间隔靶进行回收分析,得到仿真与试验数据的对比情况,结果见表 5。由表 5 可知, EFP 水中侵彻间隔靶的试验与仿真结果吻合较好。方案 1 中前靶板穿孔直径为 31.56 mm,与仿真结果 32.83 mm 误差仅为 4%。方案 2 中 EFP 产生碎裂,靶板上有一处较深弹坑以及两个不相连的弹孔,两弹孔相距 17.22 mm,大孔直径 11.96 mm,小孔直径 8.34 mm,弹坑直径 11.34 mm。考虑方案 2 出现两处弹坑,本文将两孔侵彻面积之和与仿真穿孔面积进行对比,误差为 5.8%。方案 3 与方案 4 中,试验测得弹坑深度分别为 26.38 mm 与 17.21 mm,与仿真结果相比较,误差分别为 7.4% 与 10.1%。值得注意的是,仅方案 1 中 EFP 成型完整,其他几组试验中, EFP 均发生了不同程度的碎裂。

EFP 在水介质侵彻间隔靶的试验表明,由于水中阻力的影响, EFP 在水中会产生断裂与分离,形态不稳定, EFP 在水中侵彻能力有所下降,速度衰减与质量损失明显。该结构 EFP 在水中仅飞行 3.75CD 距离时即难以穿透 5 mm 薄钢靶,且超过 5CD 距离时已不具备侵彻能力。

表 5 仿真结果与试验结果对比

Table 5 Comparison of the simulation results and experimental ones

type	1	2	3	4	5
simulation results					
	$d=32.83$ mm	$d=19$ mm	$P=28.32$ mm	$P=20.06$ mm	-
experiment results					
	$d=31.56$ mm	$d_1=11.96$ mm $d_2=8.34$ mm	$P=26.38$ mm	$P=17.21$ mm	-

Note: d is the penetration diameter, and P is the penetration depth.

4 结 论

针对本研究战斗部所形成的 EFP, 采用数值模拟与试验验证相结合的手段, 探讨了 EFP 在水中的速度衰减与质量损失规律, 得到了 EFP 对水中间隔靶的侵彻规律。

(1) 获得了 EFP 水中速度和质量衰减规律, EFP 在水中速度先是线性衰减后呈指数规律变化, EFP 入水后磨损变形明显甚至碎裂, 质量急剧减少, 随着在水中飞行距离的增加质量逐渐趋于稳定, 此时 EFP 剩余质量约为初始质量的 $1/3 \sim 1/5$ 。

(2) 获得了 EFP 水中侵彻间隔靶的作用规律, EFP 在水中飞行 $1.25CD$ 时, EFP 可穿透前靶板并形成直径约 $0.8CD$ 的弹孔, 并对第二块靶板造成深约 $0.9CD$ 的冲塞变形; 在水中飞行 2.5 倍装药直径的距离时, 仍可穿透薄靶板并形成 $0.5CD$ 的弹孔; 在水中飞行 3.75 倍装药直径的距离时即难以穿透薄靶板; 在水中飞行超过 5 倍装药直径的距离时已不具备侵彻能力。

参考文献:

- [1] 龚月珍. 鱼雷战斗部聚能定向爆炸的研究[J]. 舰船科学技术, 1993(4): 20-26.
GONG Yue-zhen. Study on directional blasting of shaped charge in torpedo warhead[J]. *Ship Science and Technology*, 1993(4): 20-26.
- [2] Saroha D R, Kumar D, Singh Y P. Penetration behaviour simulation of shaped charge jets in water filled targets[C]//26th International Symposium on Ballistics, Miami; 2011, 1392-1400.
- [3] Saroha D R, Kumar D, Singh Gurmit, Mahala V K. An experimental study of penetration behavior of shaped charge jets in water filled target[C]//24th International Symposium on Ballistics, USA; 2008, 2-8.
- [4] Yaziv D, Mayseless M, Cooper Z, et al. The penetration process of jets and long rods in water[C]//26th International Symposium on Ballistics, Miami; 2011, 1803-1811.
- [5] Max Peters. Development of techniques for investigation energy contributions to target deformation and penetration during reactive projectile hypervelocity impact[D]. Monterey California: Naval Postgraduate School, 2009.
- [6] XING Shi-long, HUANG Xiang-ke. Simulation study on high-powered shaped warhead penetration into target with water layer[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 532: 242-245.
- [7] 罗健, 周晓蔚. 串联聚能装药在水下弹药中的应用[J]. 火箭技术, 1996(4): 38-44.
LUO Jian, ZHOU Xiao-ru. Application of tandem shaped charge in underwater ammunition[J]. *Projectiles and Rockets Techniques*, 1996(4): 38-44.
- [8] 李成兵, 裴明敬, 沈兆武. 聚能杆式弹丸侵彻水夹层复合靶相似律分析[J]. 炸药学报, 2006, 29(6): 1-5.
LI Cheng-bing, PEI Ming-jing, SHEN Zhao-wu. Analysis of similitude law of rod-shaped projectile penetrating into compound target with water interlayer[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2006, 29(6): 1-5.
- [9] PEI Ming-jing, LI Cheng-bing. Experimental investigation of SCRSP penetrating the compound target with water interlayer[J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2008, 31(3): 15-19.
- [10] 史进伟, 罗兴柏, 蒋建伟, 等. 射流侵彻水夹层间隔靶板的理论和实验研究[J]. 含能材料, 2016, 24(3): 213-218.
SHI Jin-wei, LUO Xing-bai, JIANG Jian-wei, et al. Numerical simulation and experimental study on the cratering stage of shaped charge jet penetrating into target[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(3): 213-218.

- [11] 王海福, 江增荣, 李向荣. 药型罩参数对聚能装药水下作用效应的影响[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(5): 405-409.
WANG Hai-fu, JIANG Zeng-rong, LI Xiang-rong. Influences of liner parameters on the effects of shaped charge operating underwater[J]. *Transaction of Beijing Institute Technology*, 2006, 26(5): 405-409.
- [12] WANG Hai-fu, LI Xiang-rong, FENG Shun-shan. Numerical simulation of twin EFPs passing through water[C] // Proceedings of the 2003 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics, Guilin, 2003: 780-783.
- [13] 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 Li, ZHANG Qing-ming, SHI Dang-yong. Numerical simulation for the penetration of explosively formed projectile into water[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2009, 29(2): 117-119.
- [14] 曹兵. EFP 战斗部水下作用特性研究[J]. 火工品, 2007(3): 1-5.
CAO Bing. Study on the performance of EFP warhead operating underwater[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2007(3): 1-5.
- [15] Livermore. LS-DYNA keyword users manual[CP]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [16] LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, LI Wen-bin. The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37: 414-424.
- [17] 顾建农, 张志宏, 郑学龄, 等. 弹体入水弹道研究综述[J]. 海军工程大学学报, 2000, 90(1): 18-23.
GU Jian-nong, ZHANG Zhi-hong, ZHENG Xue-ling, et al. A review of the body's water-entry ballistics research[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2000, 90(1): 18-23.

Numerical Simulation and Experimental Study on Flight Characteristics and Penetration Against Spaced Targets of EFP in Water

WANG Ya-jun, LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, LI Wen-bin

(ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at the applied problem in underwater munitions of explosively formed projectile(EFP) warhead, the rule of velocity attenuation, mass loss and penetration ability against spaced targets under different distance conditions of EFP in water was simulated and studied by the LS-DYNA finite element software. The test verification was carried out by a high-speed photography. Results show that the configuration of EFP after entering water is unstable. The mass of EFP is sharply decreased, even leads to fragmentation. With increasing the traveling distance of EFP in water, the mass of EFP is reduced to $1/3 \sim 1/5$ of initial mass. The velocity of EFP in water decreases linearly at first and then decays exponentially. The EFP of traveling the 2.5 times charge diameter distance can penetrate the 5 mm target plate, but the EFP of traveling the 5 times more than charge diameter distance has no penetration ability.

Key words: explosively formed projectile(EFP); water medium; penetration; numerical simulation; flight characteristics

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.06.003



更正

本刊 2017 年第 3 期 227 页图 1 的注释有误,更正为:

1,6—电雷管, 2,7—传爆药柱, 3—电探针, 4—参试药柱, 5—圆筒, 8—光源弹, 9—高速相机

1,6—electric detonator, 2,7—booster, 3—electric probe, 4—sample, 5—cylinder, 8—lamp-house bomb,

9—high-speed video camera