

空气和水介质中EFP形成特性的数值仿真研究

姜鑫圣, 王金相, 李恒, 唐奎, 林尚剑

引用本文:

姜鑫圣, 王金相, 李恒, 等. 空气和水介质中EFP形成特性的数值仿真研究[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(6): 1-6.

您可能感兴趣的其他文章

1. [一种包覆式爆炸成型弹丸数值模拟研究](#)

引用本文: 韩阳阳, 尹建平, 王志军, 等. 一种包覆式爆炸成型弹丸数值模拟研究[J]. [兵器装备工程学报](#), 2018, 39(12): 63-67.

2. [结构参数对小长径比装药形成EFP的影响](#)

引用本文: 赵飞扬, 王志军, 王雪飞. 结构参数对小长径比装药形成EFP的影响[J]. [兵器装备工程学报](#), 2019, 40(9): 60-64.

3. [壳体结构对EFP成形性能的影响](#)

引用本文: 池朋飞, 曹兵, 史庆杰. 壳体结构对EFP成形性能的影响[J]. [兵器装备工程学报](#), 2018, 39(10): 87-90.

4. [药型罩参数对悬浮雷弹战斗部EFP成形效果影响](#)

引用本文: 袁志华, 王广程, 李回滨, 等. 药型罩参数对悬浮雷弹战斗部EFP成形效果影响[J]. [兵器装备工程学报](#), 2016, 37(11): 1-5.

5. [次口径三层球缺药型罩形成串联EFP数值模拟](#)

引用本文: 窦成彪, 尹建平, 徐全振, 等. 次口径三层球缺药型罩形成串联EFP数值模拟[J]. [兵器装备工程学报](#), 2017, 38(4): 63-67.

空气和水介质中 EFP 形成特性的数值仿真研究

姜鑫圣¹,王金相¹,李恒²,唐奎¹,林尚剑¹

(1. 南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 南京 210094; 2. 海军研究院, 北京 102401)

摘要:为掌握水介质中 EFP 成型的参数设计方法,开展了 4 种 EFP(向后翻转型、向前压合型、压垮型和长杆型)在空气和水介质中形成特征的对比数值仿真研究,确定了上述 4 种 EFP 在水介质中成型的参数要求,分析了水介质中 EFP 成型参数的变化规律。结果表明:相同装药条件下,水介质中药型罩获得的能量比空气中大,药型罩沿母线罩微元压垮速度梯度更大,从而形成长径比更大的 EFP 结构;与空气中相比,向后翻转型 EFP、长杆型 EFP、向前压合型 EFP 及压垮型 EFP 在水中良好成型所需药型罩壁厚分别增大 26.7%、20.0%、10.0%、66.7%,可调整药型罩曲率半径得到与空气中形成特征类似的 EFP 结构;以向前压合型 EFP 为例,水介质环境下,随着药型罩壁厚的增大,EFP 速度和长径比减小,而随着药型罩曲率半径的增大,EFP 速度将增大而长径比减小,在一定范围内,随着空气罩长度的增大,EFP 在爆炸成型后的平均速度较小,但 EFP 长径比将会增大。

关键词:爆炸成型弹丸(EFP);水介质;弹丸结构;参数设计;数值仿真

本文引用格式:姜鑫圣,王金相,李恒,等. 空气和水介质中 EFP 形成特性的数值仿真研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020,41(06):1-6.

Citation format:JIANG Xinsheng, WANG Jinxaing, LI Heng, et al. Study on Characteristics of EFP Formation in Air and Water Medium by Numerical Simulation[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020,41(06):1-6.

中图分类号:TJ410.33

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2020)06-0001-06

Study on Characteristics of EFP Formation in Air and Water Medium by Numerical Simulation

JIANG Xinsheng¹, WANG Jinxaing¹, LI Heng², TANG Kui¹, LIN Shangjian¹

(1. National Key Laboratory of Transient Physics,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Naval Research Academy, Beijing 102401, China)

Abstract: In order to explore the difference between EFP formation in air and water, and achieve a good design configuration of EFP formation in water, four kinds of EFP (Backward-Folding EFP, Forward-Folding EFP, Radial Collapse EFP and Long Rod EFP) were carried out to discuss the characteristics of EFP formation in air and water by numerical simulation. The parameters of the four EFPs formation in water were determined, and the parameters' effects on EFP formation were analyzed. The results in the water show that under the same charge condition, the energy obtained by the liner is larger, and the velocity difference of the liner along the busbar liner is larger, to get a EFP structure with larger length-diameter ratio in water than in air. Compared with that in the air, the thickness of the liner with Backward-Folding EFP, long rod EFP, Forward-Folding EFP and Radial Collapse EFP has an increase by 26.7%,

收稿日期:2019-08-01;修回日期:2019-08-15

基金项目:国家自然科学基金项目(11672138);预研创新项目(3020605020205)

作者简介:姜鑫圣(1996—),男,硕士,主要从事 EFP 成型及毁伤能力研究,E-mail:JiangXinsheng@njust.edu.cn。

通讯作者:王金相(1978—),男,研究员,博士生导师,主要从事爆炸与冲击动力学研究,E-mail:wjx@njust.edu.cn。

20.0% , 10.0% and 66.7% respectively. We can attain a similar EFP structure in air by adjusting the curvature radius of liner. Taking Forward-Folding EFP as an example, by the thickness of liner increasing, the EFP velocity and length-diameter ratio decrease, the curvature radius of liner increases too. If velocity increases, the length-diameter ratio will decrease. In a certain range, with the longer the length of air liner, EFP velocity has a slight change after explosion, but the EFP length-diameter ratio becomes larger.

Key words: explosively formed projectile(EFP); water medium; projectile structure; parameters design; numerical simulation

爆炸成型弹丸(EFP)是聚能装药的一种,具有对炸高不敏感、质量大、稳定性好、毁伤效果好等优点。为得到良好EFP构型,国内外对于EFP的成型过程开展了大量研究。Hussain G^[1],段建^[2],姚志华^[3]等研究了药型罩材料等因素和结构参数对成型的EFP结构性能的影响;唐蜜等^[4]运用正交设计方法探究了药型罩各成型因素对EFP成型速度的影响规律,对EFP的结构参数设计有着重要指导作用。随着现代水中兵器技术的发展,为了增大水中兵器战斗部的毁伤能力,国内外科科研机构逐渐开始探索EFP等聚能装药作为水下弹药的应用。Janzon S G等^[5]运用数值模拟方法分别研究了铜和钽EFP水中侵彻和失效问题;Lam C等^[6]对比研究了细长型及“馒头型”两种EFP在水中侵彻过程中的消蚀及速度变化过程;Hussain G等^[7]对EFP水中飞行及侵彻靶板的过程进行了仿真与试验研究,探求了EFP水中速度变化情况及EFP的有效炸高;杨莉等^[8-9]也对EFP在水中飞行特性与侵彻规律进行了研究;王雅君等^[10-11]利用EFP等效模型方法对其进一步数值仿真研究,并试验验证了等效EFP方法的有效性,在此基础上探究了EFP结构参数对其水中飞行特性的影响。曹兵^[12]通过对比试验研究证明了EFP水中爆炸成型与空气中成型再入水侵彻之间的差异。当前,大部分研究都是以EFP空气中良好成型后再入水为前提进行的,有必要结合水下EFP的研究,获得与空气中近似的、成型良好的EFP结构,以推进EFP聚能战斗部在水中兵器的实际应用。

本文针对水介质中EFP的设计需求,通过数值仿真方法,分析了影响EFP形成特征的关键因素及影响规律,利用LS-DYNA软件开展了四种EFP空中和水中形成特征的对比数值试验,得到了水介质中四种EFP设计参数调整方法,揭示了水介质中EFP成型参数的影响规律。

1 EFP空中和水中成型特征的数值模拟

水介质对EFP的成型具有较大的影响,在相同装药条件下,水的阻力作用会通过影响药型罩微元的压垮速度分布进而影响EFP的成型。为使水中EFP也能够良好成型,需对比分析空气中与水中EFP成型效果,根据水的粘滞阻力对EFP成型的具体影响效果来调整EFP形成特征关键影响因素,如壁厚参数;为得到与空气中形成特征相似的EFP,再进一步调整曲率半径参数。为此,如图1以空气中良好形成EFP的成型参数为基础,通过数值模拟方法对四种EFP(向

后翻转型、向前压合型、压垮型和长杆型)进行了空中和水中成型数值模拟对比试验,以两种介质中EFP构型一致为前提,以此分析水中EFP形成特征和动能特性。

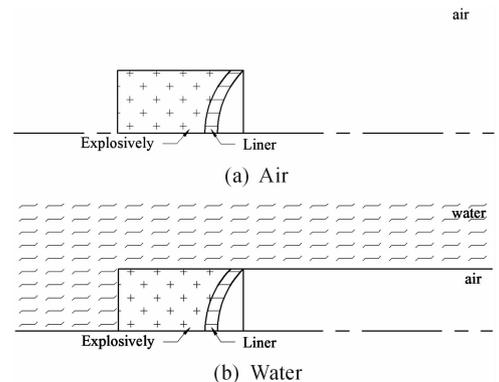


图1 EFP成型数值试验方案示意图

1.1 仿真模型

药型罩材料选用紫铜,战斗部装药直径 $D = 30$ mm,采用8701炸药,装药高度取1倍装药直径,起爆方式为中心点起爆。由于模型为轴对称结构,采用1/4模型,如图2所示,网格单元采用六面体SOLID164单元,对称边界施加无反射边界条件,并施加对称约束。考虑到成型过程中的网格畸变问题,流固耦合采用ALE耦合法,其中药型罩使用拉格朗日网格,炸药、空气以及水域采用欧拉网格。

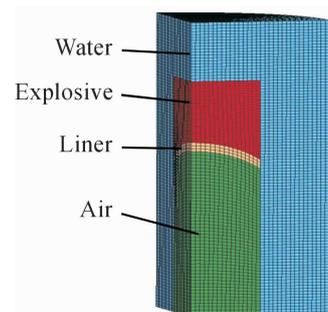


图2 1/4有限元模型

仿真材料模型以及参数的选取参考王雅君^[10]和桂毓林^[13]对EFP的成型及在水中运动特性的仿真研究。装药8701炸药用高能炸药材料模型和JWL状态方程描述。

JWL状态方程^[14]的表达式为:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega e_0}{V} \quad (1)$$

式(1)中: A, B, R_1, R_2 和 ω 为 JWL 状态方程参数, e_0 为比内能, V 是相对体积。炸药参数为: $\rho = 1.787 \text{ g/cm}^3$, $D = 8.39 \text{ km/s}$, $p_{\text{CJ}} = 30 \text{ GPa}$, $A = 58.14 \text{ GPa}$, $B = 6.801 \text{ GPa}$, $R_1 = 4.1$, $R_2 = 1$, $\omega = 0.35$, $e_0 = 9.0 \text{ GPa}$ 。

紫铜药型罩采用 Grüneisen 状态方程和 Steinberg 本构模型描述;空气和水也采用 Grüneisen 状态方程,材料模型则采用常见的空物质模型描述。

Grüneisen 方程表达式^[14]为:

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s - 1)\mu]^2} + \gamma \left\{ \rho_e - \frac{1}{2} \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s - 1)\mu]^2} \frac{\mu}{1 + \mu} \right\} \quad (2)$$

式(2)中: $\mu = \rho/\rho_0 - 1$; c_0 和 s 分别为 Rankine-Hugoniot us-up 直线的截距和斜率, γ 为 Grüneisen 系数。紫铜的参数为: $c_0 = 3.94 \text{ km/s}$, $s = 1.49$, $\gamma = 2.02$; 空气的参数为: $\rho = 1.29 \text{ g/cm}^3$, $c_0 = 0.344 \text{ km/s}$, $s = 0$, $\gamma = 1.4$; 水的参数为: $\rho = 1.00 \text{ g/cm}^3$, $c_0 = 1.48 \text{ km/s}$, $s = 1.75$, $\gamma = 0.28$ 。

Steinberg 本构模型^[14]的表达式为:

$$\sigma = \sigma_0 [1 + \beta(\gamma_i + \bar{\varepsilon}^n)] \Gamma \left[1 + b' p V^{\frac{1}{3}} - h \left(\frac{E_i - E_c}{3R'} - 300 \right) \right] e^{-f E_i / E_m - E_i} \quad (3)$$

式(3)中: β, b', h, R', f, n 为材料常数, σ_0 为初始屈服应力, γ_i 为初始塑性应变, E_i 为比内能, E_c 为冷压缩能, E_m 为熔化能。紫铜的 Steinberg 本构方程参数为: $\rho = 8.93 \text{ g/cm}^3$, $G_0 = 47.7 \text{ GPa}$, $\beta = 36.0$, $b' = 2.83$, $h = 3.77 e^{-4}$, $R' = 0$, $f = 0.001$, $n = 0.45$ 。

1.2 仿真试验设计

以空气中成型效果较好的 4 种 EFP 成型参数为基础,形成向后翻转型、向前压合型、压垮型和长杆型,各型 EFP 的长径比分别为:1.32, 1.32, 0.80, 4.50。按照表 1 所列的方案对 4 种 EFP 分别进行水中爆炸成型数值仿真。对每种 EFP, 首先仅改变药型罩壁厚参数,确定其在水介质中良好成型所需的壁厚大小,然后再以确定的壁厚大小为基础改变药型罩曲率半径,进一步得到与空气中成型特征(长径比)相似的 EFP 结构。

对于非等壁厚药型罩,将贴近炸药一侧曲面的曲率半径作为外曲率半径 r_1 ,则另一侧与战斗部内空气介质接触的曲面的曲率半径作为内曲率半径 r_2 。

随着药型罩壁厚的增大,水中形成的 EFP 结构行形态越好,所形成的 EFP 速度及长径比会有所减小,向后翻转型、向前压合型、压垮型和长杆型 EFP 其药型罩壁厚 δ 分别为 3.8 mm、2.2 mm、5 mm、2.4 mm 时 EFP 在水中能够良好成型;在壁厚等参数一定的条件下,随着曲率半径的增大,对水中形成 EFP 结构形态的影响程度与壁厚改变相比较小,所形成 EFP 的速度会有所增大,同时向后翻转型 EFP 的长径比会有所增大,而其他三种 EFP 的长径比会有所减小,向后翻转型、向前压合型、压垮型和长杆型 EFP 其药型罩曲率半径 r/D 分

别为 0.78, 0.87, 0.65, 0.71 时 EFP 的长径比与空气中近似,分别为 1.41, 1.39, 0.67, 4.72。

表 1 4 种 EFP 水中数值仿真设计方案

EFP 类型	药型罩成型参数取值	
向后翻转型	壁厚 δ/mm	3, 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 4.0
	曲率半径 r/D	0.71, 0.78, 0.87, 1.00, 1.18
向前压合型	壁厚 δ/mm	2, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3.0
	外曲率半径 r_1/D	0.71, 0.78, 0.87, 1.00, 1.18
压垮型	壁厚 δ/mm	3, 3.5, 4, 4.5, 5
	外曲率半径 r_1/D	0.65, 0.71, 0.78, 0.87
长杆型	壁厚 δ/mm	2, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3.0
	曲率半径 r/D	0.71, 0.78, 0.87, 1.00, 1.18

2 仿真结果与分析

表 2 为相同药型罩成型参数下,4 种 EFP 分别在空气和水中形成特性。可以得知与空气中相比,无论哪种类型的 EFP,在水介质环境下都会形成长径比及速度更大的 EFP 结构。其中压垮型 EFP 受水介质环境影响最大,其 EFP 长径比和速度增量最大;向后翻转型与长杆型 EFP 所受影响程度相似;向前压合型 EFP 受水介质影响程度最小,EFP 长径比和速度增大幅度最小。为进一步探究 EFP 在空气和水介质环境下形成特性的差别,从 EFP 成型参数、EFP 能量和成型效果影响因素与规律 3 个方面对表 1 中数值模拟的仿真结果进行分析。

表 2 相同成型参数下 EFP 空中与水中的长径比和速度

EFP 类型	空气中		水中	
	长径比	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	长径比	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
向后翻转型	1.32	847	3.11	881
向前压合型	1.32	1 890	1.45	1 980
压垮型	0.96	1 200	2.23	1 350
长杆型	4.5	1 210	6.14	1 230

2.1 EFP 成型参数

表 3 为 4 种 EFP 分别在空气中与水中数值仿真结果及其对应的成型参数,可以看出相同成型参数下 4 种 EFP 在水介质环境下形成的 EFP 结构的长径比与空气中相比均有所增大,且水介质对 EFP 的成型具有较大的影响,除向前压合型 EFP 外其他 3 种 EFP 成型效果较差,适当增大药型罩壁厚参数即可实现水中 EFP 的良好成型。

相比于空气中成型,在水介质中,向后翻转型 EFP、长杆型 EFP、向前压合型 EFP 及压垮型 EFP 良好成型所需药型罩壁厚分别增大了 26.7%、20.0%、10.0%、66.7%。可以发现,成型模式同为向后翻转式的向后翻转型及长杆型 EFP 壁厚增大幅度近似,而成型模式同为向前压垮式的向前压合型及压垮型 EFP 的壁厚增大幅度却具有很大的区别。向前压合型 EFP 的成型模式药型罩边缘部分微元压垮速度较大,水的粘滞阻力反而降低了药型罩罩微元沿母线的压垮速度梯度,从而更易形成稳定的 EFP 结构,并且即使不改变壁厚也能保证在水中较好成型,其壁厚所需增大幅度较小;而压垮型 EFP 虽然成型模式相似,但药型罩罩微元沿母线压垮速度梯度较小,从而形成近球形的 EFP 结构,水的粘滞阻力对罩

微元压垮速度影响较大,促进药型罩边缘向前压垮并形成向前压合型 EFP 的结构,较难使药型罩沿母线罩微元压垮速度梯度降低,只有当壁厚增大到一定程度才能使得药型罩边缘向前压垮并在轴心相遇和反方向汇聚,从而形成近球形的 EFP 结构。

比较药型罩壁厚及曲率半径参数对成型的影响规律可知,影响 EFP 成型的关键因素为药型罩的壁厚,而其曲率半径参数对 EFP 成型的影响较小。以空气中 EFP 的形成为参考,仅向后翻转型 EFP 在增大壁厚后再改变曲率半径以得到近似理想的 EFP 结构,曲率半径仅作为壁厚参数确定后进一步得到近似理想结构的深度设计参数。

表3 EFP 初始成型参数及数值仿真效果

EFP 类型	空气中	水中修改参数前	水中修改参数后
向后翻转型	$\delta = 3 \text{ mm}, r/D = 0.71$ 	$\delta = 3 \text{ mm}, r/D = 0.71$ 	$\delta = 3.8 \text{ mm}, r/D = 0.78$ 
向前压合型	$\delta = 2 \text{ mm}, r_1/D = 0.71,$ $r_2/D = 1.43$ 	$\delta = 2 \text{ mm}, r_1/D = 0.71,$ $r_2/D = 1.43$ 	$\delta = 2.2 \text{ mm}, r_1/D = 0.87,$ $r_2/D = 1.43$ 
压垮型	$\delta = 3 \text{ mm}, r_1/D = 0.65,$ $r_2/D = 1.00$ 	$\delta = 3 \text{ mm}, r_1/D = 0.65,$ $r_2/D = 1.00$ 	$\delta = 5 \text{ mm}, r_1/D = 0.65,$ $r_2/D = 1.00$ 
长杆型	$\delta = 2 \text{ mm}, r/D = 0.71$ 	$\delta = 2 \text{ mm}, r/D = 0.71$ 	$\delta = 2.4 \text{ mm}, r/D = 0.71$ 

2.2 空中与水中 EFP 能量对比分析

取表 3 中四种 EFP 分别在空气和水介质中相同参数工况作为分析对象,图 3 为成型模式都为向后翻转式的向后翻转型及长杆型 EFP 在空气中与水中药型罩动能的变化曲线,图 4 为成型模式都为向前压垮式的向前压合型及压垮型 EFP。可以得知,水中 EFP 聚能战斗部的聚能效果更好,药型罩所获得的能量比空气中高。其中,向后翻转型 EFP 在水介质环境下获得动能较空气中提高了 11.2%,长杆型 EFP 则提高了 7.6%,向前压合型 EFP 提高了 25.9%,压垮型 EFP 则提高了 11.7%。与向后翻转式成型模式的两种 EFP 相比,向前压垮式的两种 EFP 受水介质影响较小,能量损失程度较小,其中向前压合型 EFP 水中成型聚能效果提升显著,进而使得水中成型 EFP 速度比空气中要大,而压垮型 EFP 水中成型速度则比空气中略小。

由 4 种典型 EFP 的对比数值试验可知,EFP 聚能战斗部在水介质环境下药型罩所获得的能量比空气中高,对应在水介质中获得与空气中形成特征类似的 EFP 结构所需药型罩壁厚也要增大:向后翻转型、长杆型、向前压合型、压垮型 EFP 分别增大了 26.7%、20.0%、10.0%、66.7%。

2.3 水中 EFP 成型效果影响因素分析

以向前压合型 EFP 为例,保持药型罩曲率半径等其他参数不变,仅分析药型罩壁厚对 EFP 成型效果的影响,分别取药型罩壁厚 $\delta = 2 \text{ mm}, 2.2 \text{ mm}, 2.4 \text{ mm}, 2.6 \text{ mm}, 2.8 \text{ mm}, 3 \text{ mm}$,得到表征 EFP 成型特征的速度以及长径比随壁厚的变化曲线如图 5。

为分析药型罩曲率半径对 EFP 成型效果的影响,保持药型罩壁厚、内曲率半径等其他参数不变,药型罩外曲率半径与装药直径之比 r_1/D 分别为 0.71、0.78、0.87、1.00、1.18,

得到表征 EFP 成型特征的速度以及长径比随外曲率半径的变化曲线如图 6。

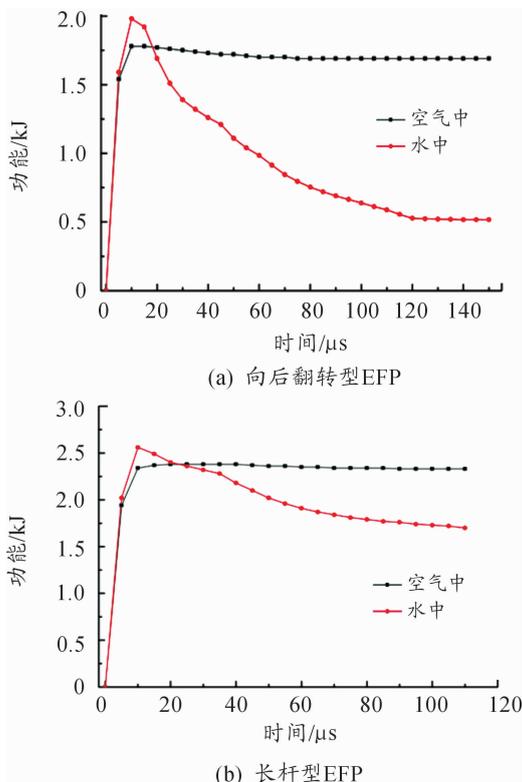


图3 空中和水中成型动能曲线

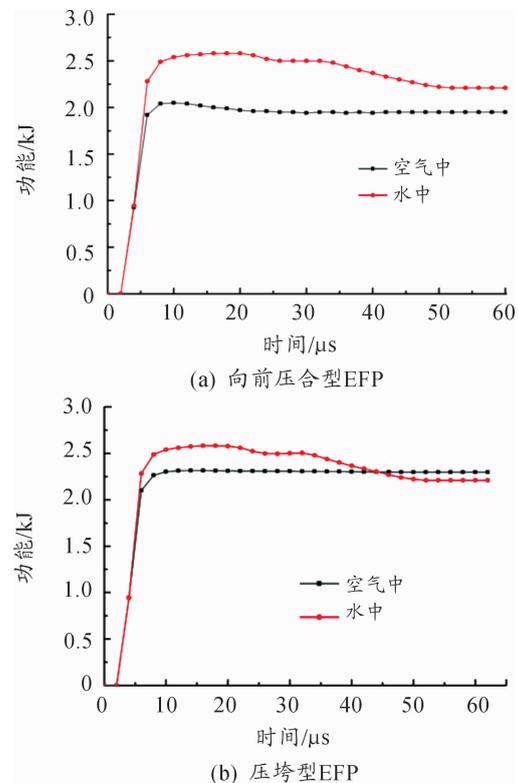


图4 空中和水中成型动能曲线

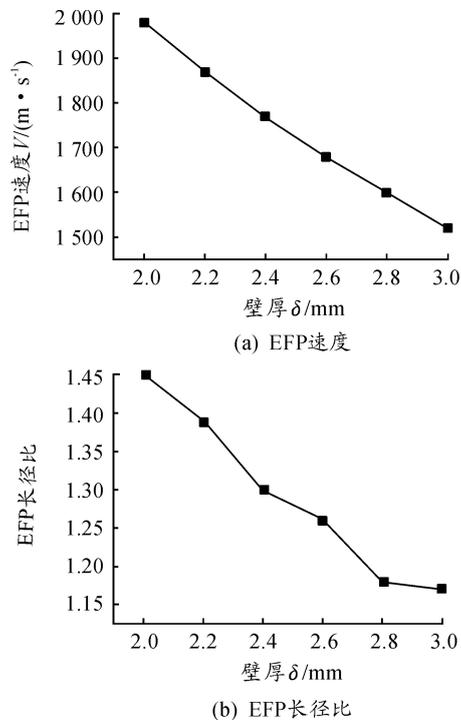


图5 表征 EFP 形成特征参数随壁厚变化曲线

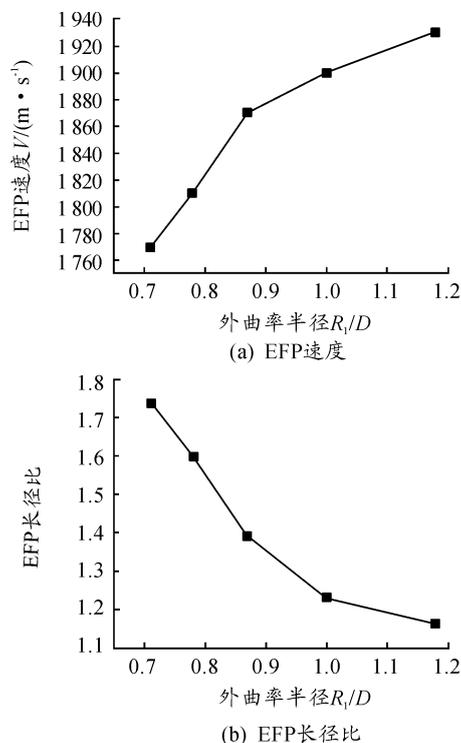


图6 表征 EFP 形成特征参数随外曲率半径变化曲线

空气罩长度,也即水中 EFP 战斗部内空气炸高。为分析空气罩长度对 EFP 成型效果的影响,保持药型罩壁厚、内外曲率半径等成型参数不变,空气罩长度与装药直径之比 l/D 分别取 0.91、1.05、1.19、1.33、1.47、1.62 得到表征 EFP 成型特征的速度以及长径比随空气罩长度的变化曲线如图 7。

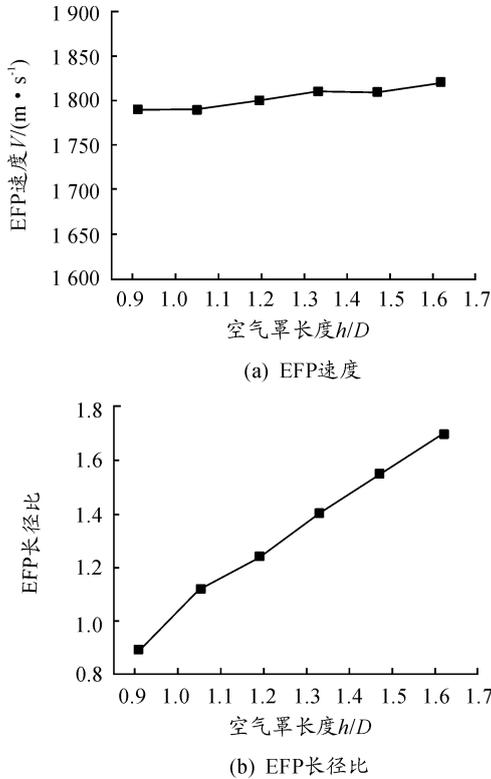


图7 表征 EFP 形成特征参数随空气罩长度变化曲线

可以得知在水介质环境下,向前压合型 EFP 的速度随着药型罩壁厚的增大而减小,随着药型罩外曲率半径的增大而增大;EFP 长径比随着药型罩壁厚度和曲率半径的增大而减小;向前压合型 EFP 爆炸成型后平均速度受空气罩长度变化的影响不大,在一定范围内,随着空气罩长度的增加,EFP 长径比也增大。

3 结论

1) 相同装药条件下,水介质中药型罩获得的能量要大,向后翻转型、长杆型、向前压合型及压垮型 EFP 获得的动能分别提高了 11.2%、7.6%、25.9%、11.7%,药型罩沿母线罩微元压垮速度梯度更大,从而形成长径比更大的 EFP 结构。

2) 与空气中相比,4 种 EFP 为实现水中良好成型,需要优先增大药型罩壁厚,其中向后翻转型、长杆型、向前压合型及压垮型 EFP 在水中良好成型对应所需的药型罩壁厚将分别增大 26.7%、20.0%、10.0%、66.7%,可进而调整药型罩曲率半径得到与空气中形成特征类似的 EFP 结构。

3) 以向前压合型 EFP 为例,水介质环境中 EFP 的速度随着药型罩壁厚的增大而减小,随着药型罩曲率半径的增大而增大;EFP 长径比随着药型罩壁厚度和曲率半径的增大而减小;在一定范围内,随着空气罩长度的增大,EFP 在爆炸成型后的平均速度较稳定,但 EFP 长径比会增大。

参考文献:

- [1] HUSSAIN G, HAMEED A, HETHERINGTON J G, et al. Analytical performance study of explosively formed projectiles[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2013, 54(1): 10-20.
- [2] 段建,周刚,王可慧,等. 结构参数对爆炸成型弹丸性能影响的研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(6): 103-107.
- [3] 姚志华,王志军,王辉,等. 锥角和壁厚对多爆炸成型弹丸成型影响的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2011(4): 85-88.
- [4] 唐蜜,柏劲松,李平,等. 爆炸成型弹丸成型因素的正交设计研究[J]. 火工品, 2006(5): 38-40.
- [5] JANZON S G, CHICK M, BUSSELL T. Penetration and failure of explosively formed penetrators in water: an experimental and computational study[C]//The 14th International Symposium on Ballistics, Canada: IBC, 1993: 611-617.
- [6] LAM C, MCQUEEN D. Study of the penetration of water by an explosively formed projectile[R]. Australia: Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 1998: 1-10.
- [7] HUSSAIN G, HAMEED A, HETHERINGTON J G, et al. The Explosively Formed Projectile (EFP) as a Standoff Sea Mine Neutralization Device[J]. Journal of Energetic Materials, 2013, 31(2): 100-114.
- [8] 杨莉,张庆明,巨圆圆. 爆炸成型弹丸对含水复合装甲侵彻的实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(3): 197-200.
- [9] 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.
- [10] 王雅君,李伟兵,王晓鸣. EFP 水中飞行特性及侵彻间隔靶的仿真与试验研究[J]. 含能材料, 2017, 25(6): 459-465.
- [11] 王雅君,李伟兵,李文彬,等. 爆炸成型模拟弹丸水中飞行影响因素[J]. 弹道学报, 2018, 30(1): 87-92.
- [12] 曹兵. EFP 战斗部水下作用特性研究[J]. 火工品, 2007(3): 1-5.
- [13] 桂毓林,于川,刘仓理,等. 带尾翼的翻转型爆炸成型弹丸的三维数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 313-318.
- [14] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual [M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2007.

科学编辑 李海涛 博士(海军大学副教授、硕导)

责任编辑 周江川