

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.06.007

线型聚能切割器水下切割钢板性能的数值模拟研究*

潘书才^① 钟明寿^② 谢兴博^② 王敏^②

^①中国人民解放军91857部队(浙江宁波,315040)

^②中国人民解放军陆军工程大学野战工程学院(江苏南京,210007)

[摘要] 借助 ANSYS/LS-DYNA 软件对线型聚能切割器水下切割钢板性能的影响因素进行了数值模拟研究。重点分析了水介质、有无药型罩和带有空气槽对射流侵彻靶板的特性影响。结果表明:聚能槽内的水介质会阻碍射流的形成,严重影响切割性能;带有空气槽的切割器可以提供射流形成的空间,大幅提高射流的侵彻能力;通过对无药型罩切割器水下切割钢板的数值计算,得到的钢板侵彻深度可达 15.3 mm,相比有药型罩时,无药型罩的切割深度有了很大提高,侵彻深度大约是有药型罩的 3 倍,接近空气中线型聚能切割器对钢板的切割深度 17.2 mm。

[关键词] 爆炸力学;线型聚能切割器;水下切割;聚能射流

[分类号] TU756.5

Numerical Simulation on Underwater Plate Cutting Performance of Linear Shaped Charge Cutter

PAN Shucan^①, ZHONG Mingshou^②, XIE Xingbo^②, WANG Min^②

^① Unit 91857, PLA (Zhejiang Ningbo, 315040)

^② College of Field Engineering, PLA Army Engineering University (Jiangsu Nanjing, 210007)

[ABSTRACT] ANSYS/LS-DYNA was used to simulate influence factors on underwater plate cutting performance of linear shaped charge cutter. Effects of water, liner and air groove on cutting plate properties were mainly analyzed. Numerical simulation results indicate that the water in shaped groove would hinder the formation of jets and affect the cutting performance greatly; cutter with air tank can provide jet formation space and improve the penetration ability of jet greatly. Penetration depth is confirmed as 15.3 mm based on numerical calculation of underwater steel plate cutting by no-liner cutter, and cutting depth have greatly improved compared to that formed by liner cutter. Penetration depth by no-liner cutter is three times of that by liner cutter, and its cutting depth is close to 17.2 mm achieved by linear charge cutter in air.

[KEYWORDS] explosion mechanics; linear shaped charge cutter; underwater cutting; shape charge jet; numerical simulation

引言

由于民用爆破工程及军事需要,线型切割器在水下的应用越来越广泛;由于水介质的特殊性,聚能切割器水下应用要比空气中困难得多。由于水的密度、传热速度和黏度等参数要比空气大得多,使得射流在水中高速运动时,所受的摩擦阻力更大,能量也更为分散,射流头部速度比空气中低^[1-2]。当使用裸露于水中的切割器进行爆炸切割试验时,几乎达

不到切割的目的。目前,切割器的水下应用主要是通过一定的加工工艺且采取合适的防水措施,使得切割器与水隔绝,从而达到较好的切割效果。

国内对切割器水下应用较早的单位是南京理工大学。江德安^[3]对水下聚能切割器切割废弃油井进行了研究,并提出了一种新型结构的聚能切割器,成功地用于废弃油井的切割上。李新会等^[4]对环状聚能爆炸切割器的水下性能进行了研究,根据理想流体射流运动的关系式,计算得出了爆炸切割器水下爆炸后的射流速度,并在水下进行了爆破性能试

* 收稿日期:2017-05-17

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51339006)、江苏省自然科学基金(BK20151449)

作者简介:潘书才(1979-),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:建筑工程。E-mail:66338543@qq.com

通信作者:钟明寿(1983-),男,博士,讲师。主要研究方向:爆破理论及爆破器材应用技术。E-mail:zhongms7@126.com

验,证明了采用V型聚能药型罩能够达到切断或破
损水下柔性锁链的目的。温万治^[5]、马海洋^[6]等
对空气中聚能装药侵彻钢板全过程进行了数值模拟。

本文中,利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对
水下聚能切割器切割钢板的过程进行了数值模拟,
重点分析了水介质的阻滞降温、空气槽和药型罩对
射流侵彻靶板的特性影响。为军事及工程应用提供
理论指导,为适用于水下作业的线性聚能切割器的
结构设计提供参考。

1 聚能切割器水下切割钢板的数值计 算模型

1.1 数值计算模型

图1是所用的II型线型聚能切割器的截面视
图,切割器药型罩厚度为1mm,锥角为90°,装药采
用8701炸药,药型罩材料为铅铋合金。

数值模型由药型罩、炸药、空气(或水)3部分
组成,其中空气(或水)域通常用来填充爆炸产物。考
虑到模型的对称性,建立对称模型。对空气域的形
状进行优化,如图2所示,并在其外侧设置透射边界
用以表示无限区域,模型截面网格单元划分为0.5
mm,采用自由网格划分,共包含127 044个节点单
元。射流侵彻ALE模型中添加了钢板部分,对射流
冲击钢管过程运用流固耦合算法,钢板单元采用
Lagrange网格划分,其余部分为Eular网格划分。由
于研究钢板的冲击毁伤效应,拓宽了空气(或水)区
域的横向尺寸,同时对钢板单元产生剧烈变形区域
采用密集网格,其他单元采用稀疏网格,模型共包含
36 905个节点单元。模型中切割器外壳与钢管材料
参数分别如表1、表2所示^[7-8]。

1.2 材料模型

切割器模型依据试验所用切割参数建立,炸药

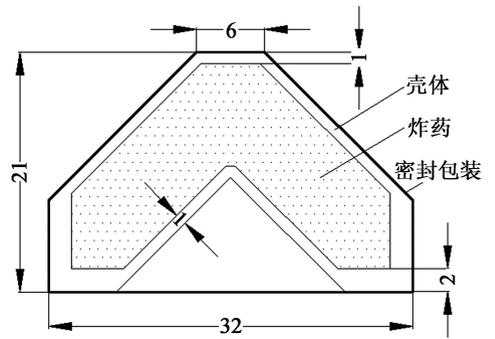


图1 常用切割器截面视图(单位:mm)

Fig.1 Sectional view of the common used
cutter (unit:mm)



图2 空气域模型

Fig.2 Finite element computing model of air part

为8701炸药,炸药及爆轰产物的材料模型采用关键
字为Mat_High_Explosive_Burn的高能燃烧模型,状
态方程采用JWL方程^[9],其形式为

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \tag{1}$$

式中:A、B、R₁、R₂和ω为材料参数;p为压力;V为
爆轰产物的相对体积;E₀为爆轰产物的初始化
内能。

切割器外壳为铅铋合金,采用Steinberg材料模

表1 线型切割器参数

Tab.1 Material parameters of the linear cutter

材料	材料模型	密度/ (g · cm ⁻³)	剪切模量 G ₀	截断压力 p _c /MPa	β	n	b	h
铅铋合金	Steinberg	11.3	0.086	-9	110	0.52	11.63	0.001 16

表2 钢管材料参数

Tab.2 Material parameters of the steel pipe

材料	材料模型	密度/ (g · cm ⁻³)	剪切模量 G ₀	截断压力 p _c /MPa	A/MPa	B/MPa	n	C
X90 钢	Johnson-Cook	7.83	0.77	-9	650.0	439.0	0.503	0.1

型^[10]。该模型着重于压力和温度对剪切模量和屈服强度的影响,适用于高应变率条件下的材料冲击响应描述,其形式为

$$G = G_0 [1 + bpV^{\frac{1}{3}} - h(\frac{E_i - E_c}{3R'} - 300)] e^{-\frac{fE_i}{E_m} - E_i} \quad (2)$$

式中: G_0 、 b 、 h 和 f 为试验确定的材料参数; p 为压力; V 为相对体积; $R' = R_p/A$, R_p 是气体常数, A 是原子量; E_i 为当前能量; E_c 为冷压缩能量; E_m 为融化能量。

屈服强度的定义如下:

$$\sigma_y = \sigma_0 [1 + bpV^{\frac{1}{3}} - h(\frac{E_i - E_c}{3R'} - 300)] e^{-\frac{fE_i}{E_m} - E_i} \quad (3)$$

当 E_m 超过 E_i 时,

$$\sigma_y = \sigma_0' [1 + \beta(\gamma_i + \bar{\epsilon}^p)]^n \quad (4)$$

式中: γ_i 为初始弹性应变,当 σ_0' 超过 σ_m 时, σ_0' 设置为与 σ_m 相等。

靶钢板为 A3 钢,采用 Johnson-Cook 材料模型,水介质采用 Null 材料模型和 Gruneisen 状态方程,空气介质为 Null 材料模型和线性多项式状态方程。

2 水介质对切割效果的影响

2.1 空气域及水域中切割器模型

为了从整体上把握水介质对线型切割器切割效果的影响,首先进行两者的比较,计算模型采用 ALE 流固耦合算法,具体模型如图 3,所选炸高为 10 mm,可以使射流充分拉伸以达到更好的切割效果。

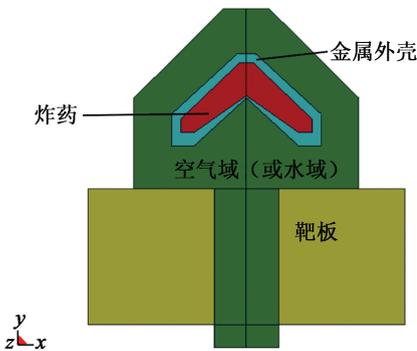


图 3 数值计算模型

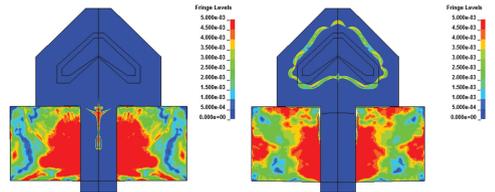
Fig. 3 Finite element computing model

第一次建模时,线型切割器周围所充斥的是空气介质,建完模型后进行计算,可以得到切割器在空气介质中切割钢板的数值模拟结果。第二次建模,将切割器周围空气介质换为水介质,不做其他处理,模型建好后进行计算,便得到了线型聚能切割器直

接在水域中切割钢板的数值模拟结果;而后对两次模拟的数值计算结果进行对比分析,便得到了水介质对切割效果的整体影响。

2.2 聚能射流比较

对图 4 侵彻靶板过程的分析,可以发现空气中及水中侵彻过程的不同。空气中靶板的侵彻主要是靠高速金属射流的切割作用;而水中金属射流根本无法到达靶板处,靶板的侵彻不是金属射流的直接作用,而是通过水介质的传压作用造成的。



(a) 空气域

(b) 水域

图 4 射流侵彻钢板(空气域和水域)过程

Fig. 4 Penetration of jet flow to steel plate

(air or water)

进一步对两种介质中金属射流头部速度进行分析(如图 5、图 6),空气中射流头部速度可达 3 500 ~ 4 000 m/s,且在到达靶板前保持稳定;而水中射流头部速度最高仅 2 000 m/s,而且该速度是在爆炸初

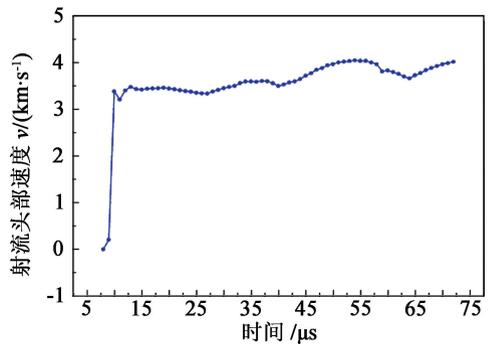


图 5 空气中射流头部速度

Fig. 5 Velocity of jet head in air

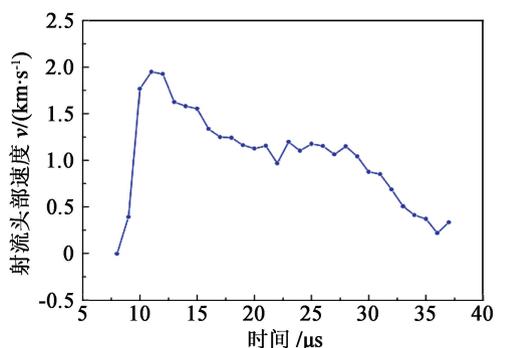


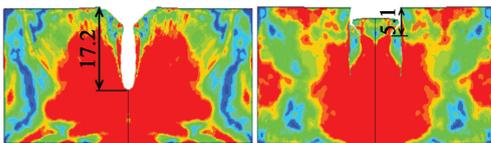
图 6 水中射流头部速度

Fig. 6 Velocity of jet head in water

期具有的,之后由于水的阻滞作用,射流速度会迅速下降,最终在到达靶板之前衰减为 0。从射流头部速度的分析中也证明了水介质对于爆炸法切割具有很大的影响,具体表现在水的阻滞以及降温作用使得射流无法形成以及被拉伸,阻碍射流传播;但同样,水具有不可压缩性,使得爆炸产生的压力衰减很小,巨大的水压也会对钢板产生破坏。

2.3 侵彻能力比较

从图 7 可以看出,对于水介质来说,线型切割器无法产生有效的金属射流,而且射流在水的阻力作用下也无法作用到靶板上,因此,切割器对于靶板的侵彻主要是通过炸药爆炸所产生的聚能效应,使得水介质的压力急剧增加,而后通过水压对靶板进行侵彻破坏,所以水介质中的靶板侵彻图像不是很规则。最后,对射流侵彻靶板的深度进行了测量(如图 7),结果显示,在炸高为 10 mm 的情况下,空气中的线型切割器对钢板的侵彻深度可达 17.2 mm,而在水介质中,其切割效果被大大削弱,仅造成了 5.1 mm 的不规则裂纹,切割能力下降了 70%。试验中,在炸高 10 mm 条件下,空气中切割钢板深度为 17.5 mm,水中无空气层的切割深度为 5.0 mm,可见数值模拟与试验结果吻合较好。若不做任何防水或其他措施,线型切割器的水下切割能力受到极大的削弱。



(a) 空气域 (b) 水域
图 7 钢板侵彻深度(单位:mm)

Fig. 7 Penetration depth of steel plate(unit:mm)

3 药型罩对切割效果的影响

3.1 无药型罩切割器模型

研究表明,水下聚能切割时金属射流未能有效形成拉伸,而且没有和靶板直接接触,因此靶板所受到的破坏效应是由于水压的作用而产生的。在有药型罩的情况下,药型罩的压垮变形同样会消耗炸药的能量;因此,建立没有药型罩的数值仿真,以探究在该情况下的切割效果。

线型切割器采用一体化的外壳模型,在本次建模中被分成外壳与药型罩两部分,将药型罩部分的铅铋合金材料模型换为水域,数值模型如图 8。进行网格划分时,将药型罩部分与其他水域一起进行划分,最终得到了无药型罩的线型聚能切割器在水

下切割钢板的数值模型,对该模型施加约束并计算,便得到了无药型罩的线型切割器在水中起爆后对水介质以及钢板的影响。

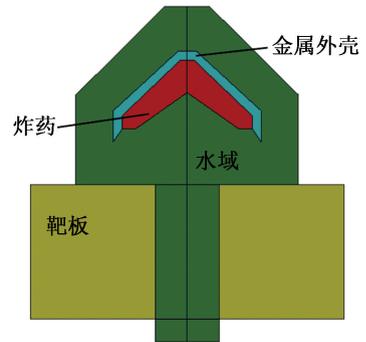


图 8 无药型罩模型

Fig. 8 Finite element computing model without cover

3.2 无药型罩切割器侵彻过程

对计算结果进行处理,得到炸药爆炸后的压力云图(图 9),从图 9 中可以很好地看到聚能装药在爆炸后的压力汇聚以及侵彻靶板的过程。由于爆炸产物沿法线方向膨胀,挤压水介质,再加上线型切割器的对称结构,会将水介质向中心轴线方向挤压,导致压力在中轴线处发生突跃式的提升。在起爆后第 36 μs ,水中开始有压力向轴线方向汇聚,此时汇聚区的压力还不是很大,约为 9.3 GPa;之后压力持续增加,在 38 μs 时,压力峰值可达 12.0 GPa 左右;而后压力的峰值面运动至靶板界面,钢材料在巨大的压力作用下发生塑性变形,同时水中压力迅速卸载,

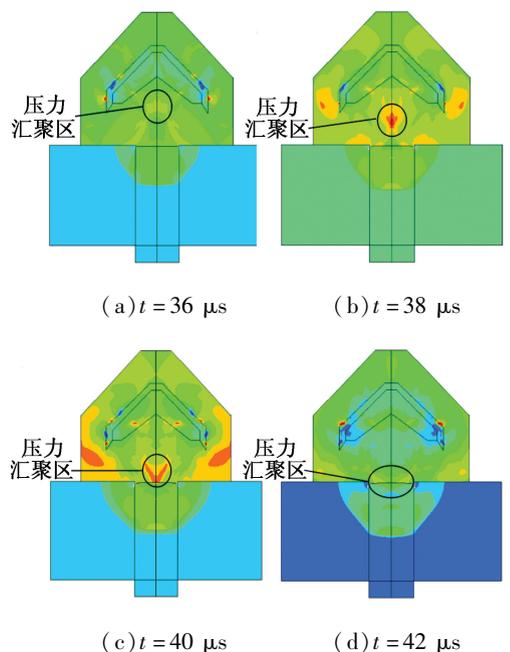


图 9 水下无药型罩切割过程压力云图

Fig. 9 Pressure nephogram of cutting process in water without cover

峰值压力迅速减小;到达 $42 \mu\text{s}$ 时,这一波的压力基本卸载完毕,之后会有新一轮的压力汇聚,对钢板进行持续地侵彻,直至最终炸药能量耗尽。

通过对无药型罩切割器水下切割钢板的数值计算,得到的钢板侵彻深度可达 15.3 mm (图 10),其切割深度约是有药型罩的 3 倍,接近空气中线型聚能切割器的钢板切割深度。可以明显看出,无药型罩切割器侵彻钢板的形状与空气中金属射流切割钢板的形状有很大差别,水中的水压切割切口不规则,而且切口可能不是一个,切口不规整、不易控制,在工程实际应用中,需要予以考虑。

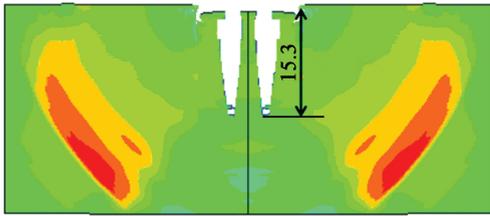


图 10 水中无药型罩钢板侵彻深度(单位:mm)

Fig. 10 Penetration depth of steel plate without cover in water(unit:mm)

4 空气槽对切割效果的影响

4.1 带有空气模的切割器模型

结合之前的分析,考虑到军事或工程实践中,在进行水下爆破切割时,一般都要对线型切割器的聚能槽部位进行防水处理;因此建立了带有空气槽的线型聚能切割器模型,具体模拟了进行防水处理的切割器侵彻钢板的过程。模型如图 11 所示,为了与试验对比,该模型采用 10 mm 炸高。与以前模型的主要不同为,本模型共分为 5 个部分,其中,流体包含两部分:一是覆盖在切割器外围的水域;二是为保证射流正常形成设在聚能槽下方的空气域。流体介质由一种变为两种,本次网格划分采用局部自由网格划分,通过将本来一大块的面进行切割,得到工整的矩形或梯形面,进而采用映射网格划分,从而使得计算精度及速度大大提升。

4.2 侵彻过程

从图 12 可以看出切割器爆炸后炸药、药型罩、空气、水各部分随时间变化的情况。图 12 中内部青色部分代表爆炸产物所占部分,青色外围的紫色部分为壳体以及药型罩压垮变形后的形状,可以很明显地看出金属射流的形状,红色部分为水介质,黄色部分为空气。在整个射流形成及侵彻过程中,虽说

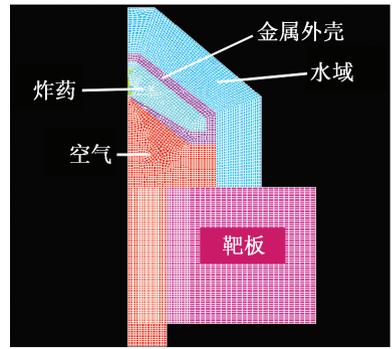


图 11 带空气槽的数值模型

Fig. 11 Finite element computing model with air groove

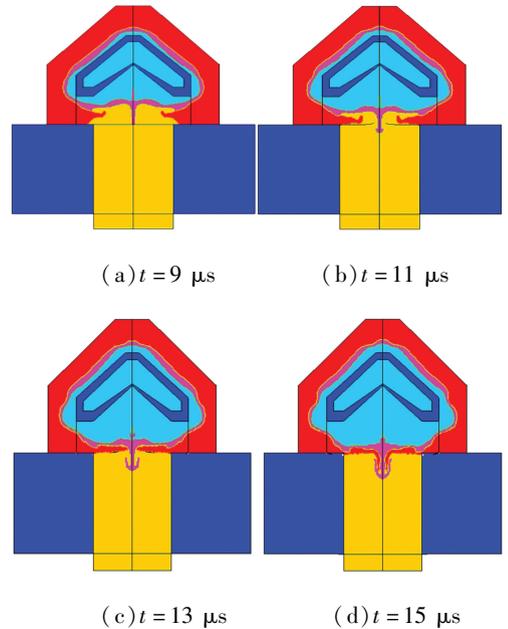


图 12 射流侵彻过程各部分变化趋势

Fig. 12 Variation trend of each part in penetration process of jet flow

存在水压,使得切割器的壳体部分难以向外扩张,从而使装药能量大多汇聚到聚能槽部位,有利于射流速度的提高;但是从图 12 中也可以看出,爆炸后水介质同样会流向空气聚能槽,由于水的降温及较大的阻力,使得射流的形成以及运动受到阻碍。如在 $9 \mu\text{s}$ 时已有水介质流入空气槽,到 $15 \mu\text{s}$ 时水介质已经流入射流侵彻靶板所形成的空槽内,在此之后,射流头部直接受到水的降温及阻滞作用,很难再向下侵彻,从而导致了侵彻靶板的效果不理想。

4.3 侵彻效果比较

从钢板的侵彻效果来看,数值模拟的靶板侵彻深度约有 7.1 mm (图 13),试验所得的侵彻深度只有 5.0 mm ,两者数据的偏差可能是由于试验中防水措施有缺陷造成的。理论上来说,线型切割器壳体部分外围被水介质包裹,而射流成型部分防水措施

良好的话,其切割深度是要比同等炸高条件下在空气中的切割效果更好。但是从数值模拟过程也看出,虽然炸高的存在有利于射流的充分拉伸,但是不可避免地导致水介质流入其中,由于水的降温以及阻滞作用,使得射流的动能、内能迅速减小,使得钢板切割深度尚不及空气中同等炸高的一半。

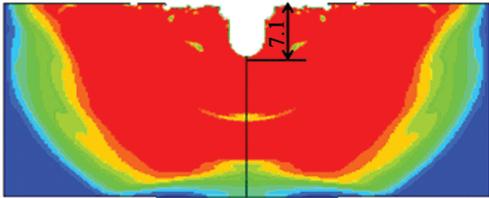


图 13 带空气槽靶板侵彻深度(单位:mm)

Fig. 13 Penetration depth of target plate with air shaped groove (unit:mm)

5 结 论

1) 在 10 mm 炸高下,线型聚能切割器在空气中切割钢板的深度可达 17.2 mm,远远大于水域中的 5.1 mm,而且通过对射流形成以及不同距离处压力曲线的分析,可以得到水介质对于射流形成与拉伸具有相当大的影响,在不做防水处理时,水中射流在未达到钢板时便会耗尽能量。

2) 在水中无药型罩时,钢板的切割纯粹是靠水的压力。在没有药型罩变形与吸收能量后,爆炸能量更容易汇聚,从而产生超压,峰值压力可达 12 GPa,超过钢材的应力极限。以此对靶板进行切割,其切割深度达到 15.3 mm,约是有药型罩的 3 倍,接近相同炸高下空气中的切割深度 17.2 mm。

3) 水下爆破切割时,若是存在空气槽,从理论上分析是会提高切割深度的,但是直接从钢板侵彻结果来看,其侵彻深度仅有 7.1 mm,远远小于空气中的切割深度。仔细观察射流侵彻过程发现,水介质会在侵彻过程中与射流接触,从而影响了侵彻效果。因此,在水下采用爆破法切割时,若有防水措施,不宜采用大炸高进行切割。

参 考 文 献

[1] 王宝兴,谷鸿平,屈璟林,等. 水下线形聚能装药切割钢靶的数值模拟及试验验证[J]. 火炸药学报,2010,33(6):65-68.
WANG B X, GU H P, QU J L, et al. Experimental and numerical study on the linear shaped charge cutting steel

target under water[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2012,33(6):65-68.

- [2] 颜事龙,王尹军,王昌建. 水下爆炸切割钢板的试验研究[J]. 爆破器材,2004,33(2):26-29.
YAN S L, WANG Y J, WANG C J. Experimental research on cutting steel plate of underwater explosion [J]. Explosive Materials, 2004, 33(2): 26-29.
- [3] 江德安. 水下线型聚能切割器研究[D]. 大连:大连理工大学,2008.
JIANG D A. Research on underwater linear shaped charge cutters [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [4] 李新会,高频. 环状聚能爆炸切割器水下性能研究[J]. 爆破,2008,25(4):79-81.
LI X H, GAO P. Underwater blasting performance research of ring energy-accumulated bangalore torpedo [J]. Blasting, 2008, 25(4): 79-81.
- [5] 温万治,恽寿榕,赵衡阳,等. 聚能装药侵彻钢板全过程的数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2001,21(2):126-130.
WEN W Z, YUN S R, ZHAO H Y, et al. Numerical simulation for penetration of a steel slab by a shaped charge[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(2): 126-130.
- [6] 马海洋,龙源,何洋扬. 炸高对线型聚能切割器切割深度影响的数值分析[J]. 火工品,2008(4):28-32.
MA H Y, LONG Y, HE Y Y. Numerical analysis on effects of burst height on penetration depth of LSCC[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(4):28-32.
- [7] HAN F, HU Y, ZHANG H. Numerical simulation of the shaped charge jet velocity effected by warhead shell[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2009, 18(2): 131-135.
- [8] HUSSAIN G, HAMEED A, HORSFALL I, et al. Experimental and simulation optimization analysis of the whipple shields against shaped charge [J]. Acta Mechanica Sinica, 2012, 28(3): 877-884.
- [9] 苟瑞君. 线性爆炸成型侵彻体形成机理研究[D]. 南京:南京理工大学,2006.
GOU R J. Forming mechanism of linear explosively formed penetrator [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [10] 彭建祥. Johnson-Cook 本构模型和 Steinberg 本构模型 的比较研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2006.
PENG J X. Comparative study of Johnson-Cook constitutive model and Steinberg constitutive model [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2006.