

# 水下线形聚能装药切割钢靶的数值模拟及试验验证

王宝兴<sup>1</sup>, 谷鸿平<sup>2</sup>, 屈璟林<sup>1</sup>, 高 强<sup>1</sup>, 袁铁刚<sup>1</sup>

(1. 北方斯伦贝谢油田技术(西安)有限公司; 2. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘 要:**应用 ANSYS/LS-DYNA 软件对不同结构线形聚能装药所形成的聚能侵彻体及切割钢靶过程进行了数值模拟。基于数值模拟设计了不同结构的线形聚能切割器,进行了切割器切割钢靶的验证试验。结果表明,在水介质中,随炸高的增加侵彻体头部速度衰减加快,切割能力下降;侵彻体切割深度沿装药长度方向呈增长趋势,随装药长度的增加将逐步达到稳定状态。

**关键词:**爆炸力学;线形聚能装药;侵彻;数值模拟;ANSYS/LS-DYNA 软件

中图分类号:TJ55; O383

文献标志码:A

文章编号:1007-7812(2010)06-0065-04

## Experimental and Numerical Study on the Linear Shaped Charge Cutting Steel Target under Water

WANG Bao-xing<sup>1</sup>, GU Hong-ping<sup>2</sup>, QU Jing-lin<sup>1</sup>, GAO Qiang<sup>1</sup>, YUAN Tie-gang<sup>1</sup>

(1. North Schlumberger Oilfield Technologies(Xi'an)Co., Ltd, Xi'an 710065, China;

2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** By using the ANSYS/LS-DYNA program, the penetrator forming and cutting steel targets process were numerically simulated on the linear shaped charges with different structures. The different structure cutters were designed and the verifying experiments of the cutter cutting steel target were carried out based on the numerical simulation. The results show that in water medium, the attenuation for the head velocity increases with increasing the blast height, and the cutting ability of the penetrator decreases. The cutting depth rises along the length direction of the linear shaped charge and levels off step by step.

**Key words:** explosion mechanics; linear shaped charge; under water; penetration; numerical simulation; ANSYS/LS-DYNA program

## 引 言

线形聚能切割技术被广泛应用于国民经济建设和军事技术中。采用该技术在拆除钢架桥梁、打捞沉船疏通航道、拆除海上钻井平台等大型工程应用中不仅可以缩短工期、减小工作量,而且可以大大提高施工的安全性和可靠性。目前,国内关于水下线形聚能切割技术的报道较少。马海洋<sup>[1]</sup>等开展了炸高对线形聚能切割深度影响的数值分析,颜事龙<sup>[2]</sup>等进行了水下爆炸切割钢板的试验研究,费爱萍<sup>[3]</sup>等开展了聚能装药射流的二维数值模拟,但这些研究所获得的切割深度只有 20~30 mm,不能满足大型工程应用的需要。

本研究利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元程序对水下线形聚能侵彻体的成型及侵彻钢靶进行了数值模拟。在装药配方、药型罩材料相同的条件下,设计了 4 种不同结构参数的线形聚能切割器,切割深度达到 80 mm 左右。结合数值模拟和试验结果分析了对侵彻体切割性能的影响因素,为水下线形聚能装药结构设计提供参考。

## 1 数值模拟

### 1.1 模型的建立

建模时简化为 1/2 模型,在相应位置施加对称约束条件,总网格数约为 50 万。图 1 所示为计算模型。基于 ANSYS/LS-DYNA 软件平台,炸药、空气、

水、药型罩4种材料使用欧拉网格建模。单元使用多物质ALE算法。靶板、底板、堵片、壳体均采用拉格朗日建模。欧拉网格与拉格朗日网格之间采用流固耦合算法<sup>[4]</sup>。考虑材料特性,选取的计算材料模型见表1。

## 1.2 模拟计算

不同设计方案的数值计算结果如表2所示。为方便参考对比,选取侵彻体到达靶面但未侵彻靶板的时刻为参考时间点。

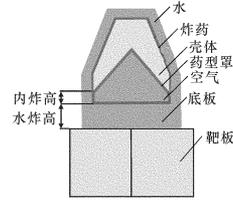


图1 计算模型

Fig.1 Momputing model

表1 数值计算材料模型

Table 1 Material model for numerical simulation

类别	材料模型	状态方程
紫铜药型罩	* MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO	* EOS_GRUNEISEN
水	* MAT_NULL	* EOS_GRUNEISEN
空气	* MAT_NULL	* EOS_LINEAR_POLYNOMIAL
炸药	* MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN	* EOS_JWL
弹壳、底板、堵片	* MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO	* EOS_GRUNEISEN
靶板	* MAT_PLASTIC_KINEMATIC	

表2 数值计算结果

Table 2 Numerical calculation results

编号	药型罩锥角/(°)	药型罩厚度/mm	内炸高/mm	水炸高/mm	最大头部速度/(m·s <sup>-1</sup> )	最低尾部速度/(m·s <sup>-1</sup> )	侵彻体宽度/mm	切割深度/mm	切割宽度/mm
1-1	80	3	20	0	3867	489	3.4	80~91	30~40
1-2	80	3	20	40	2707	259	8.0	40~71	30~48
2-1	60	2	20	0	4945	513	3.4	42~53	23~33
2-2	60	2	20	40	4043	263	6.0	42~58	30~40
3-1	60	3	5	0	4800	160	3.4	62~74	20~26
3-2	60	3	5	40	3439	286	7.0	38~57	32~45
4-1	80	2	5	0	4321	534	3.4	53~64	24~30
4-2	80	2	5	40	3300	140	7.0	39~53	32~38

## 2 试验验证

### 2.1 线形聚能切割器的设计

依据数值计算模型,设计了4种不同结构的线形聚能切割器,线性聚能装药结构参见表3。切割器壳体为2mm厚钢板,长度约为200mm;紫铜药型罩口径约为120mm<sup>[5]</sup>;装药为B炸药,药量约为5kg。其结构示意图见图2。

表3 线形聚能装药结构参数

Table 3 The structure parameters of the linear shaped charge

编号	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2	4-1	4-2
药型罩锥角/(°)	80	80	60	60	60	60	80	80
药型罩厚度/mm	3	3	2	2	3	3	2	2

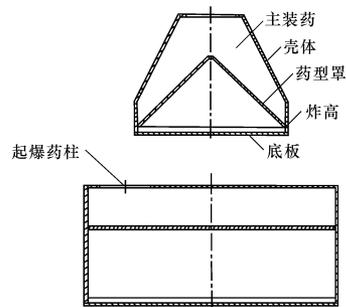


图2 线形聚能切割器结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the linear shaped charge cutter structure

### 2.2 试验方法

试验靶板为250mm×250mm×120mm的E-36钢靶板。将靶板放置在水桶内固定,靶板中心位

置上放置炸高支架, 将切割器固定在支架上, 根据试验方案调整切割器与靶板的距离(即设置切割器与靶板之间的炸高)。切割器与靶板摆放到位后加水。用电雷管起爆传爆药柱后起爆主装药。图3为有炸高两种工况的试验布置图。

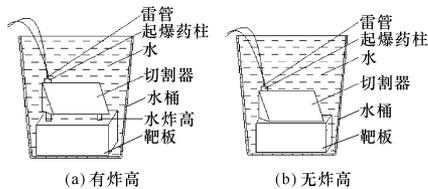


图3 试验布置示意图

Fig. 3 The experimental arrangement

### 2.3 试验结果

线形聚能切割器切割靶板的试验结果见表4, 切割缝形态见图4。

表4 试验结果

Table 4 The experimental results

编号	切割缝深度/mm	切割缝宽度/mm
1-1	70~80	33~41
1-2	40~70	34~48
2-1	40~50	20~33
2-2	30~50	30~45
3-1	40~60	13~34
3-2	10~50	21~36
4-1	10~55	25~37
4-2	30~50	30~40

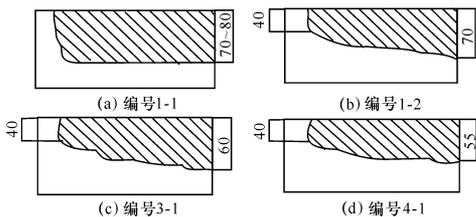


图4 靶板的切割缝形态

Fig. 4 Shape of the cutting crack on the target

表4和图4看出, 在水介质中, 增加炸高, 切割深度降低, 切割缝宽度增大; 在点起爆条件下, 起爆点一侧切割深度较浅, 切割缝形态不稳定; 编号1-1的切割深度最深, 达到70~80mm, 其切割深度、切割缝形态与数值模拟结果基本吻合。

## 3 分析与讨论

### 3.1 水炸高对侵彻体的影响

以编号2-2为例, 侵彻体在运动过程中要穿透空

气介质、底板、水介质、最后侵入靶板。由于侵彻体头部在装药长度方向上具有一定的速度梯度, 故选取该方向一段侵彻体为研究对象。图5所示为侵彻体在穿透空气层和水介质层过程中头部速度变化曲线(图中垂直线表示不同介质分界线)。由图5可看出, 起爆 $20\mu\text{s}$ 时, 侵彻体头部速度达到最大值为 $4870\text{m/s}$ , 之后在空气介质中速度降至 $4480\text{m/s}$ 。 $35\mu\text{s}$ 后侵彻体穿透底板, 从空气介质进入水介质后迅速与水发生作用, 其头部速度衰减幅度明显增大<sup>[6]</sup>, 降至 $3150\text{m/s}$ 。 $55\mu\text{s}$ 后侵彻体头部开始侵彻靶板。

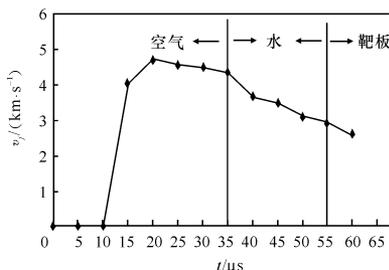


图5 切割靶板前侵彻体头部速度变化曲线

Fig. 5 The head velocity curve of the penetrator before cutting the target

图6为编号1-2形成的侵彻体从进入水介质至切割靶板前的形态变化示意图。由图6可看出, 当弹壳内炸高较小时, 由于侵彻体尚未完全形成, 在水介质中, 由于水的密度、传热速度和黏度参数比空气大的多, 导致侵彻体在水中高速运动时, 摩擦阻力增大, 能量分散, 使得侵彻体头部速度衰减加快, 降低了切割性能<sup>[2]</sup>。此外, 侵彻体在侵彻水介质的过程中, 头部出现蘑菇头形状, 使得靶板上的切割缝宽度比较大, 试验中方案1-2切割缝宽度为 $34\sim 48\text{mm}$ 。

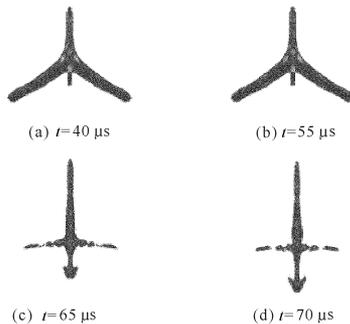


图6 水介质对侵彻体头部速度的影响

Fig. 6 Influence of water medium on the head velocity of the penetrator

### 3.2 起爆方式对侵彻体及其切割性能的影响

试验中切割器装药采用单点起爆方式,爆轰波在装药中传播的最大曲率半径  $R_m = (2 \sim 3.5)d$ , 其中  $d$  为起爆点距离药型罩底部垂直距离的 2 倍。爆轰波沿线形装药长度方向传播,爆轰产物对整个药型罩的作用过程分为 3 部分:(1)起爆点所在的平面,即  $R=0$ ,球面波的向下垂直作用;(2)传播距离  $0 < R < R_m$ ,球面波的作用;(3)传播距离  $R > R_m$ ,近似认为爆轰波阵面与药型罩表面垂直,是滑移爆轰波的作用<sup>[7]</sup>。不同传播距离上爆轰波与药型罩作用方式如图 7 所示。

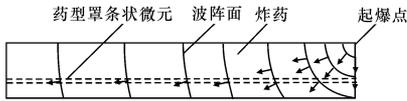


图 7 沿装药长度方向爆轰波与药型罩的相互作用

Fig. 7 Interaction between detonation waves and liner along the length direction of the shaped charge

依据以上理论分析,计算本试验所用装药结构,得到爆轰波与药型罩稳定作用的距离应大于 460 mm。因安全条件限制,切割器长度仅为 200 mm,故在此长度范围内线形装药形成的侵彻体还未达到稳定状态,炸药的能源利用率不高,侵彻深度也有限。所以以起爆点为起始位置,切割深度在装药长度方向会逐渐增大。

### 3.3 侵彻体对靶板的切割作用

编号 1-1 的切割深度约为 70~80 mm(装药两端面处稍浅),切口比较齐整,试验结果与模拟结果基本符合。编号 1-1 侵彻体对靶板切割效应如图 8 所示。

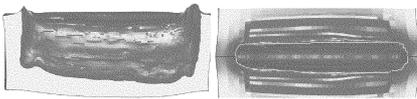


图 8 侵彻体对靶板的切割效应

Fig. 8 Cutting effect of the penetrator on the target

从起爆点一侧开始,沿装药长度方向上切割深度逐渐增大,表明侵彻体在装药长度方向上具有一定的速度梯度。由于线形聚能切割器边界因素对侵彻体的影响,装药两侧附近切割深度偏低。

## 4 结 论

(1) 试验表明,模拟的切割形态和切割深度与试验结果基本吻合,且在水介质中,随炸高的增加,切割能力下降。切割深度沿装药长度方向将逐步达到稳定状态。

(2) 利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元程序进行数值模拟的结果指导设计和应用,不仅可以优化设计参数,还可以极大缩短试验周期,降低试验费用。

### 参考文献:

- [1] 马海洋,龙源,何扬扬.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 Hai-yang, LONG Yuan, HE Yang-yang. Numerical analysis on effects of burst height on penetration depth of LSCC [J]. Initiators and Pyrotechnics, 2008(4):28-32.
- [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 Shi-long, WANG Yin-jun, WANG Chang-jian. Experimental research on cutting steel plate of underwater explosion [J]. Explosive Materials, 2004, 33(2):26-29.
- [3] 费爱萍,郭连军,陈朝军,等.线性聚能装药射流的二维数值模拟[J].矿业研究与开发,2007,27(2):72-75.  
FEI Ai-ping, GUO Lian-jun, CHEN Chao-jun, et al. Two-Dimensional numerical simulation of jet of linear shaped charge [J]. Mining Research and Development, 2007, 27(2):72-75.
- [4] ANSYS/LS-DYNA 中国技术支持中心. ANSYS/LS-DYNA 算法基础和使用方法[M].北京:北京理工大学,1999.
- [5] 郭志俊,张树才,林勇.药型罩材料技术发展现状和趋势[J].中国铝业,2005,29(4):40-42.  
GUO Zhi-jun, ZHANG Shu-cai, LIN Yong. The development of material in shaped charge warhead liner [J]. China Molybdenum Industry, 2005, 29(4):40-42.
- [6] 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].北京理工大学学报,2006,26(3):189-192.  
WANG Hai-fu, JIANG Zeng-rong, YU Wei-min, et al. Behavior of jetting penetrator charge operating underwater [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(3):189-192.
- [7] 苟瑞军.线形爆炸成型侵彻体形成机理研究[D].南京:南京理工大学,2006.