

爆炸物处理用水射流战斗部仿真研究*

张世林, 周春桂, 王志军, 郭志明, 黄德雨

(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要:为了低成本的处理爆炸物, 提出一种新型的水射流排爆战斗部结构。利用 ANSYS/LS-DYNA 软件完成了爆炸载荷下不同方案的水束成型的数值模拟, 并对优化前后的水束头部速度进行对比分析。研究表明, 在装药长径比一定的前提下, 当容器锥角为 60° 、内腔高度为 25mm 时, 水射流头部速度可达 4537m/s, 可以引爆大多数高能炸药, 在爆炸物处理领域有良好的应用前景。此方法对今后的排爆工程有一定借鉴价值。

关键词:数值模拟; 优化; 高速水束; 爆炸物处理; 战斗部

中图分类号: TJ410.33 文献标志码: A

The Simulation and Research on EOD Using Warhead of Water Jet

ZHANG Shilin, ZHOU Chungui, WANG Zhijun, GUO Zhiming, HUANG Deyu

(School of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to deal with explosive objects on the condition of lower cost, a new structure of warhead which can form water jet was proposed, it was a shape charges by changing the structure and materials based on the conical liner. Using ANSYS / LS-DYNA software to complete numerical simulation of the different options of water jet forming under explosive load, and the velocity of water jet optimized or not was analyzed by contrasting. Research showed that on the premise of the certain length-to-diameter ratio of the explosive charge, when container cone angle was 60° and cavity height was 25mm, the velocity of forehead of water jet could reach up to 4537m/s, which could be detonated most of high explosive and has a good prospect in the field of EOD. This method has some reference value in the future of the EOD.

Keywords: numerical simulation; optimization; high-speed water jet; EOD; warhead

0 引言

自 9.11 以来, 恐怖袭击事件愈演愈烈, 特别是这些年来, 爆炸物恐怖袭击也越来越多, 如何采取有效措施来应对这一问题成为世界各国关注的焦点。发现爆炸物以后如何对爆炸物进行处理, 是人们首先关注的问题之一。文中针对如何快速、简单的处理这些爆炸装置提出了一种新结构。利用炸药的聚能效应^[1], 将传统的药型罩换成液体水, 当炸药被引爆后, 将形成一股强爆轰波。水被这股爆轰波加速后, 形成一股高速水束^[2]。它可以引爆爆炸物。

文中采用数值模拟的方法, 对水束的头部速度进行研究。分析了在一定装药口径和长径比下, 水容器的角度、内腔高度两种因素对水束头部速度和成型的影响, 并采用正交设计^[3]的方法对这两个因素进行了分析研究。

1 计算模型

1.1 战斗部几何模型的建立

该战斗部由炸药、容器和水组成。炸药采用 8701 炸药, 密度 1.82 g/cm^3 , 水容器为等壁厚圆锥形状, 材料选用尼龙。装药直径为 56mm, 装药高度为 71.5mm。图 1 是该新型排爆战斗部的结构图。

文中讨论模型的结构参数为: 容器锥角 $\alpha = 60^\circ$, 装药高度 $H = 71.5 \text{ mm}$, 装药直径 $D = 56 \text{ mm}$, 内腔高度 $h = 15 \text{ mm}$, 容器壁厚 $\delta = 1.5 \text{ mm}$ 。

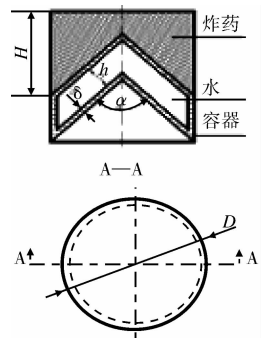


图 1 新型排爆战斗部结构图

* 收稿日期: 2010-10-11

作者简介: 张世林(1986-), 男, 湖北襄樊人, 硕士研究生, 研究方向: 弹箭仿真技术。

1.2 有限元模型的建立及仿真计算

采用 L S-DYNA 三维动力学分析软件对该战斗部水束成型过程进行数值模拟,模型中炸药、容器、水、空气均采用 Euler 单元,单元使用多物质 ALE 单元算法。有限元网格划分采用 Truegrid 前处理软件。网格单元均采用 solid164 八节点六面体单元。计算中采用的单位制为: mm-kg-ms-GPa。图 2 所示为有限元计算模型图。



图 2 有限元计算模型

1.3 材料参数

1) 炸药

炸药采用 8701 炸药,该炸药采用高能炸药材料模型,爆轰产物的膨胀采用 JWL 状态方程,并假定爆轰前沿以常速率传播。

该炸药的主要参数^[4]为:密度 $\rho = 1.787 \text{ g/cm}^3$,爆速 $D = 8390 \text{ m/s}$,波阵面压力 $P_{C-J} = 34 \text{ GPa}$ 。

JWL 状态方程精确的描述了在爆炸驱动过程中爆轰气体产物的压力、体积、能量特性,JWL 状态方程的表达式为:

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

其中 A, B, R_1, R_2 和 ω 为常数, E_0 为初始比内能。 $A = 581.4 \text{ GPa}, B = 68.01 \text{ GPa}, R_1 = 4.1, R_2 = 1.0, \omega = 0.35$ 。

2) 容器

文中选用的容器材料为尼龙,计算中使用 MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO 材料模型和 Gruneisen 状态方程。其主要参数^[4]为:密度 $\rho = 1.14 \text{ g/cm}^3$,剪切模量 $G = 2 \text{ GPa}$,屈服应力 $\sigma_y = 120 \text{ MPa}$ 。

Gruneisen 状态方程的表达式为:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a \mu) E$$

其中: C 为该材料的声速, S_1, S_2, S_3 为流体状态方程常数: $C = 2570 \text{ m/s}, S_1 = 1.849, S_2 = -0.081, S_3 = 0, \gamma_0 = 1.07$ 。

3) 水和空气

水和空气均采用 NULL 模型和 GRUNEISEN 状态方程,其参数见表 1。

表 1 空气和水的基本材料参数^[4]

	$\rho / (\text{g/cm}^3)$	$C_g / (\text{m/s})$	S_1	S_2	γ_0
空气	1.293×10^{-3}	340	0	0	1.4
水	1	1480	2.56	-1.986	0.5

2 数值模拟结果及优化

2.1 高压水束成型过程

图 3 为 $\alpha = 60^\circ, h = 25 \text{ mm}$ 时,高速水束的成型过程。

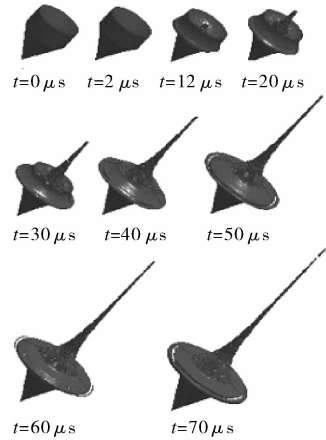


图 3 水束成型过程

由图 3 可以看出,主装药起爆后,在 $t = 2 \mu\text{s}$ 时,爆轰波以某一速度扫过容器上侧面,使得水受到炸药爆轰压力和爆轰产物的冲击和推动作用,开始被压垮、变形向前高速运动,顶部附近的水流微元向中心轴线闭合并发生相互碰撞、挤压,靠近容器内腔下侧面的水形成高压水流,而靠近内腔上侧的水形成杵体。大约在 $t = 40 \mu\text{s}$ 后,在容器底端面一定距离处,水束杵体部分出现径向断裂,该断裂层并以一定的速度沿径向飞出,形成水环。由于水束前后部分存在速度梯度,导致其在运动过程中不断拉长,当相对伸长超过一定限度时,大约在 $t = 70 \mu\text{s}$ 水束头部便发生颈缩,最终断裂。















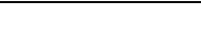
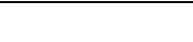
2.2 水束成型参数优化

文中主要研究该结构 α 和 h 两种因素对水束成型和头部速度的影响。设计方案如下:在装药口径和长径比一定时,该装药结构限制了 h 的范围(不超过 30mm)。所以文中设定的容器内腔高度 h 范围是 15 ~ 25mm,角度范围 $55^\circ \sim 70^\circ$ 。定义内腔高度 $h = \{h_1, h_2, h_3, h_4\}$,角度 $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4\}$,根据正交组合原理,两变量能组合成 16 种情况。文中分别对这 16 种情况进行数值模拟分析,分析对比了各种情况下的高速水束的成型情况和在一定距离处的水束头部速度情况。计算中,均采用端面中心点起爆。

鉴于在销毁简易爆炸装置时是将引爆装置靠近在它周围,故对炸高要求不高,文中均采用 2.5 倍装药直径距离处的速度作为比较对象。表 2 是 h 与 α 组

合的 16 中情况下,在 2.5 倍装药直径距离处水束形态和头部速度。

表 2 计算结果

方案	$\alpha/(\circ)$	h/mm	$\nu/(\text{m/s})$	水束形态	方案	$\alpha/(\circ)$	h/mm	$\nu/(\text{m/s})$	水束形态
1	55	10	2874		9	65	10	3302	
2	55	15	3190		10	65	15	3646	
3	55	20	3467		11	65	20	4360	
4	55	25	3513		12	65	25	4469	
5	60	10	2992		13	70	10	3137	
6	60	15	3147		14	70	15	3488	
7	60	20	4502		15	70	20	4150	
8	60	25	4537		16	70	25	4518	

在以上各方案中,可以看出在 2.5 倍直径距离处方案 8 模拟的水束头部速度最大为 4537m/s,而且水束形态优良,没有出现颈缩及断裂现象,可以作为最优组合。从表中也可以看出,在容器角度一定时,水束头部速度随着内腔高度增加而增加,当内腔高度增加到极限高度时水束头部速度增长幅度不大;在内腔高度一定时,头部速度随着角度增加小幅度的增加,但远小于随内腔高度而增加的幅度。可以看出,内腔高度对水束头部速度影响最大,角度影响次之。

以一种新型高能炸药(BH-1)为例,该炸药的临界起爆压力 P_K 参数见文献[5],根据文献[6]连续冲击压力公式:

$$p = \frac{F}{s} = \rho \nu (\nu - \nu' \cos\beta) \quad (1)$$

式中: β 为射流方向变化的角度, ν' 为反射后水流的速度,假定水射流方向变化角为 90° ,将方案 8 模拟的水束速度,代入式(1),得到 $p = 20.58\text{GPa}$,由 $p > p_{\text{BH-1K}}$,可知该水射流排爆战斗部能够引爆 BH-1 炸药。

3 结论

通过数值模拟表明,该结构设计是可行的,能够按照预先方案在爆炸载荷作用下形成一股高速水射流。射流速度与容器几何结构密切相关,研究得出两点结论:

1) 在射流长度为 2.5 倍装药直径的时候,水束头部速度达最大值 4537m/s,对炸药具有很强的冲击力,能够实现排爆功能。

2) 容器内腔厚度和锥角对水束速度的影响较大,当锥角 $\alpha \geq 65^\circ$ 时水束能够达到冲击引爆炸药的临界起爆压力,而当锥角 $\alpha < 65^\circ$ 时,需要保证容器厚度 $h > 10\text{mm}$ 才能达到临界起爆压力。这些需要在设计时加以重视。

参考文献:

[1] 隋树元,王树山. 终点效应学[M]. 北京:国防工业出版社,2000.

[2] Sandia Labs' device helps U. S. troops in Afghanistan disable improvised explosive devices[EB/OL]. https://share.sandia.gov/news/resources/news_releases/fluid-blade-disablement-tool/

[3] 北京大学数学力学系数学专业概率统计组. 正交设计一种安排多因素试验的数学方法[M]. 北京:人民教育出版社,1976.

[4] 李裕春,时党勇,赵远. ANSYS 11.0/LS-DYNA 基础理论与工程实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.

[5] 成文,胡晓东. 某新型炸药冲击起爆试验与临界起爆特性研究[J]. 火工品,2009,4(2):5-8.

[6] 何远航,李海军,张庆明. 高速水射流与凝聚炸药相互作用的数值模拟[J]. 高压物理学报,2005,19(2):169-173.