

# 环形聚能装药水射流成型过程的数值研究

裴红波, 焦清介, 聂建新

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为了研制快速、易携带的水射流排爆装置, 采用 AUTODYN 软件对 TNT、水、塑料构成的特殊形状聚能装药结构进行了二维数值模拟, 计算了不同炸药厚度下水射流形成过程, 得到了水射流形状随时间的变化规律, 分析了炸药厚度对射流速度的影响。结果表明: 该聚能装药结构是可行的, 能够按照设想形成杵状射流; 水射流的头部速度和平均速度均随炸药的厚度增加而提高。对于本研究给出的装置结构, 当炸药的厚度为 4~6 mm 时, 水射流的头部速度范围为 861~1182 m·s<sup>-1</sup>, 射流的平均速度范围为 393~571 m·s<sup>-1</sup>, 射流的速度满足理论计算的排爆要求。

**关键词:** 爆炸力学; 高速水流; 聚能装药; 爆炸物处理; 数值模拟

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.02.019

## 1 引言

随着水射流切割技术的发展, 水射流切割技术逐渐被应用到炸药切割加工和爆炸物处理<sup>[1-4]</sup>。炸药模拟件的水射流切割试验表明, 只要射流参数选择适当, 利用水射流切割炸药是可行的<sup>[5]</sup>。以上研究中水射流都是通过机电加压系统来获得, 这类设备体积较大, 成本较高, 不能普遍用于排爆领域。Alford<sup>[6]</sup>在其专利中提出了一种半圆形聚能装药装置, 该装置可以对水加速形成高速水射流, 但没有给出装置的具体尺寸和水射流的形状、速度等; 张世林<sup>[7]</sup>提出了一种 M 形状的聚能装药结构并对其进行了仿真研究, 结果表明采用该装药结构能够得到聚能水流, 但是该装药结构所需要的炸药量较大, 得到的水流速度过高, 水流与炸药作用过程中有可能引爆爆炸物。

本研究针对如何快捷、简单地处理爆炸物, 对半圆形聚能装药结构水射流成型过程进行了研究。利用炸药的聚能效应, 将传统的金属药形罩替换成水, 通过炸药的爆轰产物对水进行加速以形成一束高速水流, 从而对爆炸物形成物理破坏。采用爆炸力学通用软件 AUTODYN 计算了不同炸药厚度下水射流的形成过程, 得到了水射流形状随时间的变化, 重点分析了炸药

厚度对射流速度的影响。

## 2 水流形成过程的数值模拟

### 2.1 排爆装置的结构

排爆装置的三维结构如图 1 所示, 装置的高为 80 mm, 长为 250 mm, 宽为 150 mm。该装置主要由三部分构成, 一是上部的半圆形容器, 二是中间的环形炸药, 三是下部的凹形容器。半圆形容器半径为 40 mm, 之所以选择半径为 40 mm, 是因为当半径较大时, 难以获得较窄的水射流。容器的壳体选用等壁厚的塑料材料, 壳体厚度为 2 mm。当半圆形容器直径确定后, 影响射流速度的主要是炸药种类以及装药厚度。考虑到装药的方便和经济性, 炸药选择 TNT, 而炸药的厚度通过数值模拟来确定。

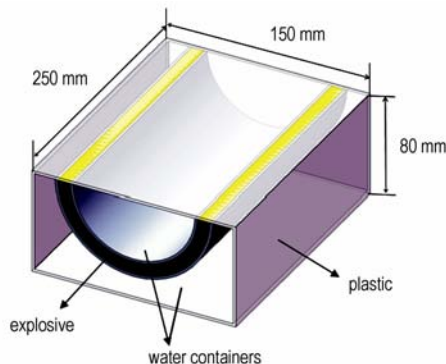


图 1 装置示意图<sup>[6]</sup>

Fig. 1 Diagram of the device<sup>[6]</sup>

收稿日期: 2012-02-09; 修回日期: 2012-07-21

基金项目: 北京理工大学研究生创新基金(2012012)

作者简介: 裴红波(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事爆炸力学方面的研究。e-mail: hongbo2751@sina.com

使用时,半圆形容器和凹形容器里都注满水,半圆容器里的水主要是作为能量传递的介质,以对爆炸物形成破坏。凹形容器中的水主要有两种作用:一是利用水的高比热,来抑制炸药爆炸产生的火焰和热量;二是在炸药爆炸初期,对爆轰产物的膨胀起到一定的限制作用,使得炸药能量更多的被半圆容器里的水吸收。

## 2.2 水射流速度的选择

当高速水射流接触到凝聚炸药表面时,会在凝聚炸药中形成冲击波,冲击波大小与水流速度大小有关,水流速度越大,在炸药中形成的冲击波压力越大。根据动量定理,水射流与炸药作用中心的最大压力为<sup>[8]</sup>:

$$\rho_H = \frac{\rho_0 c_0 v_0}{1 + (\rho_0 c_0 / \rho_e c_e)} \quad (1)$$

式中, $\rho_0$  为水射流的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $c_0$  为水射流声速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $v_0$  水射流的速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\rho_e$  为炸药密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $c_e$  为炸药声速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

一般压装炸药的冲击波感度在 1.5 GPa 以上<sup>[9]</sup>,为了安全起见,必须保证水流与炸药作用时在炸药中产生的压力不超过 1.5 GPa。常温下水的声速为  $1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,典型炸药的密度为  $1700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,声速为  $2800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,根据式(1),计算得到水流速度应小于  $1315 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

考虑到在拆除汽车炸弹等爆炸物时,高速水流还需要穿过一定厚度的金属板,为了切割开金属板,水流与其作用时压力须大于 500 MPa,对应的水流速度须大于  $370 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。综合以上考虑,水流的平均速度应该小于  $1315 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,以保证炸药不被冲击起爆,而水流的平均速度应该大于  $370 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,以确保水流有足够的动能能够对爆炸物形成破坏。

## 2.3 计算模型

理论分析聚能水流的形成比较困难,本文采用 AUTODYN 软件对聚能水流的形成过程进行了二维模拟,计算的模型如图 2 所示。图中  $H$  为装药厚度, $R$  为装药半径。模型中炸药采用 Euler 单元,对于容器的壳体选用拉格朗日单元,水则采用 ALE 单元,起爆点位于半圆环炸药的对称轴上。

## 2.4 材料状态方程

对于水采用多项式状态方程,水的状态方程与其压缩状态有关,当水压缩时( $\mu > 0$ ),状态方程为:

$$\rho = A_1 \mu + A_2 \mu^2 + A_3 \mu^3 + (B_0 + B_1 \mu) \rho_0 e \quad (2)$$

当水膨胀时( $\mu < 0$ ),状态方程为

$$\rho = T_1 \mu + T_2 \mu^2 + B_0 \rho_0 e \quad (3)$$

式中, $\rho$  为水压,kPa;  $\mu$  为压缩比;  $\mu = \rho / \rho_0 - 1$ ;  $e$  为水的比内能, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $\rho_0$  为水的初始密度;  $\rho_0 = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $A_1 = 2.2 \times 10^6 \text{ kPa}$ ,  $A_2 = 9.54 \times 10^6 \text{ kPa}$ ,  $A_3 = 1.457 \times 10^7 \text{ kPa}$ ,  $B_1 = B_2 = 0.28$ ,  $T_1 = 2.2 \times 10^6$ ,  $T_2 = 0$ 。

炸药用 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega e}{V} \quad (4)$$

式中, $p$  为爆轰产物压力,GPa;  $V$  为炸药气体产物气体体积与炸药初始体积之比;  $e$  为单位体积炸药的比内能, $\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}$ ;  $A, B, R_1, R_2, \omega$  为需要标定的常数,对于 TNT 有  $\rho_0 = 1.63 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $A = 371.2 \text{ GPa}$ ,  $B = 3.23 \text{ GPa}$ ,  $R_1 = 4.15$ ,  $R_2 = 0.95$ ,  $e = 6.993 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$ 。

壳体材料选用冲击雨果尼奥状态方程<sup>[10]</sup>:

$$D = a + bu \quad (5)$$

式中, $D$  为材料中的冲击波速度, $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ ;  $a, b$  为常数;  $u$  为质点速度, $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ ;  $a = 2.26 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ ,  $b = 1.816$ ,材料的格留乃逊系数  $\Gamma = 0.75$ ,初始密度  $\rho_0 = 1.181 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

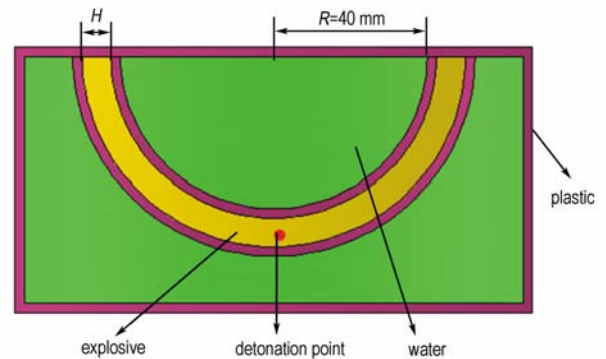


图 2 水流形成过程的数值模拟模型

Fig. 2 Model of simulation

## 3 结果与讨论

### 3.1 射流的形成过程与形状

炸药起爆后,爆轰波沿着圆弧迅速向两侧传播,在  $t = 9 \mu\text{s}$  时炸药已经爆轰反应完毕。较薄的容器壳体被迅速压碎,水在冲击波和爆轰产物的冲击和推动作用下,开始被压缩、变形。图 3 是不同炸药厚度情况下水射流的形成过程,在  $t = 30 \mu\text{s}$  时形成了两股初始水流,此时水流还比较粗,随后两股初始水流沿着中心对称面汇聚,在  $t = 60 \mu\text{s}$  时,炸药厚度  $H = 3 \text{ mm}$  和  $4 \text{ mm}$  的水射流汇聚还未完成,而  $H = 6 \text{ mm}$  和  $8 \text{ mm}$

的水射流已经由两束合为一束。在  $t = 60 \mu\text{s}$  时刻炸药爆轰产物对水的加速作用已经完成,此时水射流的平均速度保持不变。但是由于沿水流长度方向还存在着速度梯度,越靠近头部水速度越高,因此水射流被进一步拉长变得更加“锋利”。

图 4 是水射流长度随时间的变化,最开始炸药没有引爆前,水为半圆形,其长度等于其半径为 4 cm。由图 4 可以看出,在同一时刻炸药的厚度越厚,最后得到的水射流越长。

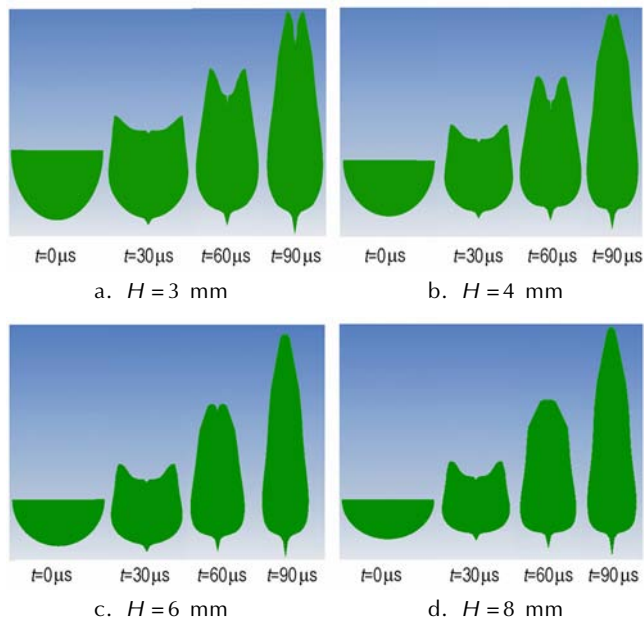


图 3 不同时刻水流的形状

Fig.3 Shape of water jet at different time

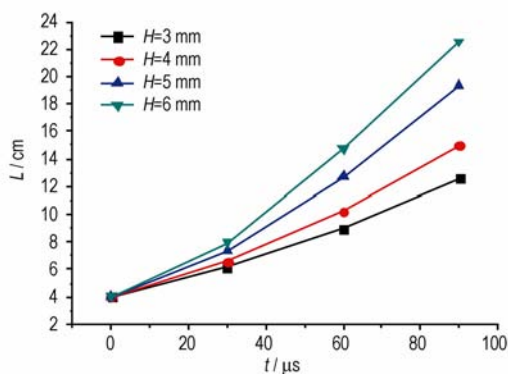


图 4 射流长度随时间的变化

Fig.4 Length of water jet at different time

### 3.2 炸药厚度对射流速度的影响

炸药质量对射流速度有着重要影响,该装置中炸药质量与炸药厚度近似成正比。不同厚度炸药情况下, $t = 90 \mu\text{s}$  时刻计算得到的射流平均速度和射流头

部速度见表 1。由表 1 可以看出,随着炸药厚度增加,射流头部速度和平均速度也随之增加。这是由于炸药厚度越厚,单位质量水射流获得的能量越多。当炸药的厚度为 4 ~ 6 mm 时,射流的速度满足前文理论计算的排爆要求,即头部射流速度小于  $1315 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,平均速度大于  $370 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图 5 为  $t = 90 \mu\text{s}$  时水流速度云图,虽然头部射流速度不相同,但是射流速度都是从头部到底部逐渐减小。射流速度相差很大,头部射流速度在  $1000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右,而底部射流速度仅为  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右。

表 1 炸药厚度对水流速度的影响

Table 1 Influence of the charge thickness on water jet velocity

$H/\text{mm}$	$M_w/M_e$	$v_a/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$v_m/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
3	3.92	308	713
4	2.92	393	861
6	1.90	571	1282
8	1.39	743	1604

Note:  $H$  is charge thickness,  $M_w$  is water mass in water container,  $M_e$  is charge mass,  $v_a$  is average velocity of water jet,  $v_m$  is velocity of top water jet.

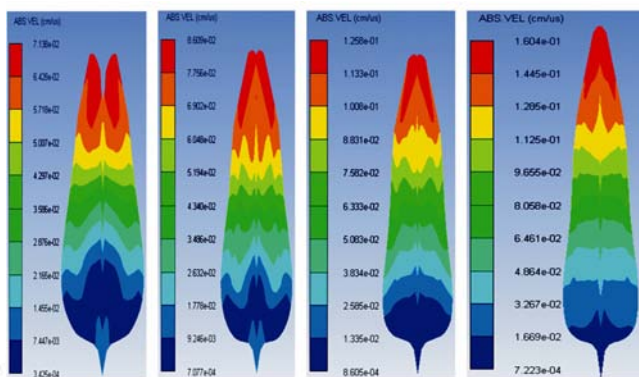


图 5 不同位置处的水流速度图 ( $t = 90 \mu\text{s}$ )

Fig.5 Velocity distributions in water jet at  $90 \mu\text{s}$

## 4 结论

(1)对环形聚能装药水射流成型过程进行了数值仿真,仿真结果表明该装药结构能够按照设想形成水射流。

(2)半圆形容器的直径确定后,影响水射流形状的主要是炸药厚度,炸药厚度越厚,水射流的形状越长,水流的头部速度与平均速度越大。

(3)本研究的装置结构,当炸药厚度为 4 ~ 6 mm 时,水射流的头部速度范围为  $861 \sim 1182 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  间,

射流平均速度范围为  $393 \sim 571 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 射流的速度满足理论计算的排爆要求。

#### 参考文献:

- [1] 杨志, 陈世明, 张毅军, 等. 高压水射流技术的发展及应用[J]. 机械管理开发, 2009, 24(5): 87-88.  
YANG Zhi, CHEN Shi-ming, ZHANG Yi-jun, et al. The development and application on the high-pressure water jet [J]. *Mechanical Management and Development*, 2009, 24(5): 87-88.
- [2] George W, Hal M, Mark M Z. The use abrasive water jet to cut munitions for explosives removal or to make them safe for deactivation furnaces[C] // International Seminar on Demilitarisation Technology for Explosives and Explosives Ordnance, England, November 1991.
- [3] Summer D A, Tyler L J, Blaine J, et al. Considerations in the design of a water jet device for reclamation of missile casings [R]. University of Missouri-Rolla, August 1992.
- [4] 李鑫勇, 王彪, 杨福合, 等. 炮弹水刀切割装置结构设计[J]. 机床与液压, 2011, 39(12): 11-14+17.  
LI Xin-yong, WANG Biao, YANG Fu-he, et al. Design on shells water jet cutting device mechanical structure[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2011, 39(12): 11-14+17.
- [5] 张国文, 陈新发. 炸药模拟件水射流切割参数的试验研究[J]. 含能材料, 2001, 9(1): 24-27.  
ZHANG Guo-wen, CHEN Xin-fa. Research on waterjet cutting parametrization test for simulated material of explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2001, 9(1): 24-27.
- [6] Alford S C. Disrupter for disrupting explosive objects, includes enclosure containing formers supporting explosive charge, and filler material; Europe, EP2045570-A2 [P], 2009-08-04.
- [7] 张世林, 周春桂, 王志军, 等. 一种新型水射流切割器成型的仿真研究[J]. 爆破器材, 2011, 40(2): 5-7.  
ZHANG Shi-lin, ZHOU Chun-gui, WANG Zhi-jun, et al. Simulation and research on water jet formation of a new type molding cutter[J]. *Explosive Materials*, 2011, 40(2): 5-7.
- [8] 张冀峰, 张庆明, 田保中. 脉冲水射流冲击起爆氯酸钾炸药的实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(9): 753-755.  
ZHANG Ji-feng, ZHANG Qing-ming, TIAN Bao-zhong. Experimental study of pulse current of water impacting and detonating on potassium chlorate explosives[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008, 28(9): 753-755.
- [9] 郑孟菊, 俞统昌, 张银亮. 炸药的性能与测试技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990: 88-89.  
ZHENG Meng-ju, YU Tong-chang, ZHANG Yin-liang. Performance and test technology of explosives [M]. Beijing: Arms Industry Press, 1990: 88-89.
- [10] AUTODYN Theory Manual, Revision 12.1 [M]. California: Century Dynamics, San Ramon, 2010.

## Numerical Study on Water Jet Formation of Semi-ring Shaped Charge

PEI Hong-bo, JIAO Qing-jie, NIE Jian-xin

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to develop a device that could disrupt explosive components quickly and easily, a special shaped charge structure was studied. AUTODYN two-dimensional program was used to simulate the forming progress of water jet. The speed of water jet with different thicknesses of explosive was obtained. The results show that that the device can generate a water jet. The water jet tip velocity and average velocity increase with thickness of explosive. And, when the thickness of explosive range from 4 to 6 mm, the water jet tip velocity ranges from 861 to 1282  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  and the average water jet velocity range form 393 to 571  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . The water jet can disrupt explosive objects safely at this velocity range in theory.

**Key words:** explosion mechanics; high speed water jet; shaped charge; disruption of explosive components; numerical simulation

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.02.019