

文章编号:1006-9941(2019)05-0385-07

# 高压水射流破碎炸药过程数值模拟

黄玉平<sup>1</sup>,崔庆忠<sup>1</sup>,徐洋<sup>1</sup>,陈明华<sup>2</sup>,吴兴宇<sup>3</sup>

(1. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 陆军研究院特种勤务研究所, 河北 石家庄 050000;

3. 北京奥信化工科技发展有限责任公司, 北京 100040)

**摘要:** 为把高压水射流技术运用到报废弹药处理工程实际中,采用数值模拟的方法,对高压水射流破碎炸药过程进行了研究。建立了以高压水射流速度为输入参数的有限元计算模型,采用拉格朗日(Lagrange)算法和光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)算法,运用DYNA求解器进行了求解,通过炸药压力、温度、反应度分析,对高压水射流破碎炸药过程的安全性进行了研究,并通过失效单元数量分析对高压水射流破碎炸药过程的有效性进行了研究。结果表明,当高压水射流速度低于 $800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,可采用高压水射流对报废弹药炸药装药进行破碎,并能保证破碎过程的安全性;当高压水射流速度为 $150\sim 350\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,能较高效地进行大截面破碎;当高压水射流速度为 $400\sim 800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,能高效实现小截面破碎。

**关键词:** 高压水射流;炸药;数值模拟

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2018213

## 1 引言

报废弹药的爆炸危险性和环境污染性,决定了对其进行处理的重要性和必要性。传统的露天焚烧法存在环境污染严重、资源浪费等问题,而焚烧炉焚烧法虽能部分利用弹药能源,但存在设备维护、处理成本高等问题,加热融出法<sup>[1]</sup>则存在适用弹药品种少、耗能高等问题,而运用高压射流介质处理方法则具有绿色环保和资源可循环利用等优点。随着报废弹药处理问题的出现,对高压水射流破碎炸药过程进行研究具有实用价值。

Fossey等<sup>[2-3]</sup>经过多次优化已实现水射流拆弹工业化应用,并可应用于高聚物粘结炸药(PBX)装药的拆除工作。Foldyna等<sup>[4]</sup>利用235 MPa的射流可将SS-23发动机内推进剂破碎至所需尺寸。Nico H A van Ham等<sup>[5]</sup>将水射流技术应用于迫击炮弹的安全处理中。Borkowski等<sup>[6]</sup>使用替代材料进行模拟试验,对

水射流技术进行了有效性考核,并分析了冲出料的粒度分布和形貌特征分布。Shyman等<sup>[7]</sup>将水射流拆弹技术运用到装填了非均质炸药的废旧弹药处理上。张国文等<sup>[8]</sup>对D-90023炸药模拟件进行水射流切割试验,确定了主要的切割参数,探索了水射流技术应用于炸药部件切割加工的可行性。钟树良等<sup>[9-10]</sup>在不同水压条件下,测出了水射流对炸药模拟材料的冲击温度,计算了不同炸药在不同的力学特性条件下水射流对炸药的冲击力,最终得到水射流切割炸药是安全、可行的结论。罗同杰等<sup>[11]</sup>开展了倒药试验,结果表明系统参数的选择是影响倒药效率、效果和药水分离的关键因素。何远航等<sup>[12]</sup>针对 $500\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的高速水射流与类太安炸药相互作用过程进行了数值模拟,对不同时刻凝聚炸药中的压力分布以及不同径向、轴向处的压力历史进行了分析,确定了所选凝聚炸药的声速。

从国内外研究现状看,国外运用高压水射流技术处理报废弹药已发展到工程化应用阶段,而国内试验方面的研究主要通过炸药模拟材料试验来确定水射流系统参数,而仿真模拟方面的工作只是针对压力分布和压力历史进行研究,尚缺乏对工程实际中运用广泛的炸药进行安全性和有效性的系统研究。为此,本工作针对B炸药(弹药装药中最重要的一类炸药,广泛应

收稿日期: 2018-08-01; 修回日期: 2018-10-10

网络出版日期: 2019-01-03

作者简介: 黄玉平(1993-),男,硕士研究生,主要从事报废弹药安全拆分技术研究。e-mail: huangyuping09@126.com

通信联系人: 崔庆忠(1969-),男,副研究员,主要从事高能炸药及装药技术研究。e-mail: cqz1969@bit.edu.cn

引用本文: 黄玉平,崔庆忠,徐洋,等. 高压水射流破碎炸药过程数值模拟[J]. 含能材料, 2019, 27(5):385-391.

HUANG Yu-ping, CUI Qing-zhong, XU Yang, et al. Numerical Simulation for the Process of Breaking Explosives by High Pressure Water Jet[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(5):385-391.

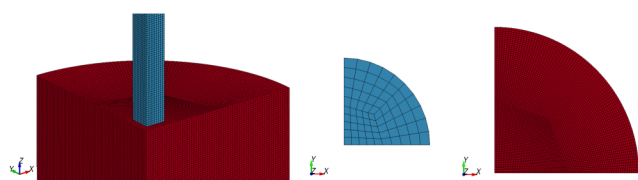
用于各种大、中口径炮弹、榴弹、破甲弹、底凹弹、航弹、导弹战斗部、水中兵器 and 火箭增程弹等装药<sup>[13]</sup>进行安全性和有效性数值模拟研究,以期得到过程安全性参数和有效性参数,用以指导高压水射流处理装填B炸药的报废弹药。

## 2 高压水射流速度对过程安全性的影响

### 2.1 有限元模型的建立

考虑到实际物理模型的对称性,采取1/4结构进行建模。B炸药与高压水射流均采用Lagrange算法,采用solid164单元进行描述,B炸药尺寸为 $\Phi 8\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ ,高压水射流尺寸为 $\Phi 1\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ ,高压水射流与炸药表面之间初始距离为0.5 mm。在TrueGrid和LS\_PrePost中进行建模,得到几何模型如图1所示。

B炸药采用流体弹塑性材料模型,状态方程为Lee-Tarver点火增长模型<sup>[14-15]</sup>,该模型包括两个JWL



a. whole model b. water jet model c. Comp.B model

图1 高压水射流破碎炸药过程安全性计算模型

Fig.1 Safety calculation models of the process of breaking explosives by high pressure water jet

表2 反应率方程参数

Table 2 Parameters of reaction rate equation

ccrit	frer	es1	ar1	es2	ar2	freq		
0.0367	0.667	0.667	0.333	0.222	1	$4.0 \times 10^6$		
eetal	em	en	Figmax	FG1max	FG2min	grow1	grow2	
7.0	2.0	3.0	0.022	0.7	0	140	1000	

三项式反应率方程描述了炸药冲击起爆到爆轰的过程,未反应炸药转变成反应产物的反应速率由三个理想物理阶段组成:(1)受到冲击压缩波作用后少量炸药发生反应的点火阶段,此时 $0 < F < \text{Figmax}$ ,对应于方程第一项;(2)初始反应扩展后的缓慢增长阶段,此时 $0 < F < \text{FG1max}$ ,对应于方程的第二项;(3)高温高压条件下的反应快速完成阶段,此时 $\text{FG2min} < F < 1$ ,对应于方程的第三项。

根据水在温度为273 K、压力达到1.1 GPa左右时就会结冰的特点,由工程应用中关于射流压力和射流流速的关系<sup>[16]</sup>,可知此时水射流流速为 $1482\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由

状态方程和一个三项式反应率方程。一个JWL状态方程用来描述未反应炸药,而另一个用来描述反应产物。JWL方程形式均为:

$$p = Ae^{-R_1 V} + Be^{-R_2 V} + \omega C_v T/V \quad (1)$$

式中, $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$ 和 $C_v$ 为常数,由圆筒试验标定; $V$ 为相对体积。状态方程参数选取如表1所示。

表1 JWL状态方程参数

Table 1 Parameters of JWL equation of state

materials	A	B	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$C_v$
unreacted	485	-0.039084	11.3	1.13	0.8938	$2.487 \times 10^{-5}$
product	5.242	0.07678	4.2	1.1	0.5	$1.0 \times 10^{-5}$

三项式反应率方程<sup>[16]</sup>形式为:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \text{freq}(1-F)^{\text{frer}} \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 - \text{ccrit} \right)^{\text{eetal}} + \text{grow1}(1-F)^{\text{es1}} F^{\text{ar1}} p^{\text{em}} + \text{grow2}(1-F)^{\text{es2}} F^{\text{ar2}} p^{\text{en}} \quad (2)$$

式中, $F$ 为反应分数; $t$ 为时间, $s$ ; $\rho_0$ 为初始密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; $\rho$ 为当前密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; $p$ 为压力,Pa。 $\text{freq}$ 和 $\text{eetal}$ 为控制点火参量,是冲击强度和作用时间的函数; $\text{frer}$ 、 $\text{es1}$ 和 $\text{es2}$ 为反应进行方向控制参数; $\text{ccrit}$ 为点火临界压缩度,当压缩度小于 $\text{ccrit}$ 时不点火; $\text{grow1}$ 、 $\text{ar1}$ 和 $\text{em}$ 为点火后早期增长反应控制参数; $\text{grow2}$ 、 $\text{ar2}$ 和 $\text{en}$ 为高压反应控制参数; $\text{Figmax}$ 、 $\text{FG1max}$ 和 $\text{FG2min}$ 为反应阶段控制参数。参数选取如表2所示<sup>[17]</sup>。

此分析可知,常温下水射流的速度应小于 $1500\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,因此高压水射流速度工况设置为 $500 \sim 1500\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,以 $100\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为步长。

### 2.2 模拟结果与讨论

#### 2.2.1 压力、温度和反应度的空间分布

为找出炸药单元中最危险单元的位置,对过程中炸药单元压力 $p$ 、温度 $T$ 和炸药反应度 $d$ 的空间分布进行分析。如图2是高压水射流速度为 $500\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时炸药单元压力 $p$ 、温度 $T$ 和炸药反应度 $d$ 空间分布。分析可知,炸药药柱截面上的压力、温度和反应度随径向距离的增加而降低,最大压力 $p_{\text{max}}$ 、最高温度

$T_{\max}$  和最大炸药反应度  $d_{\max}$  均出现在水射流头部前方炸药受冲击压缩处, 而炸药最危险单元所在位置即为最大压力  $p_{\max}$ 、最高温度  $T_{\max}$  和最大炸药反应度  $d_{\max}$  位置处。

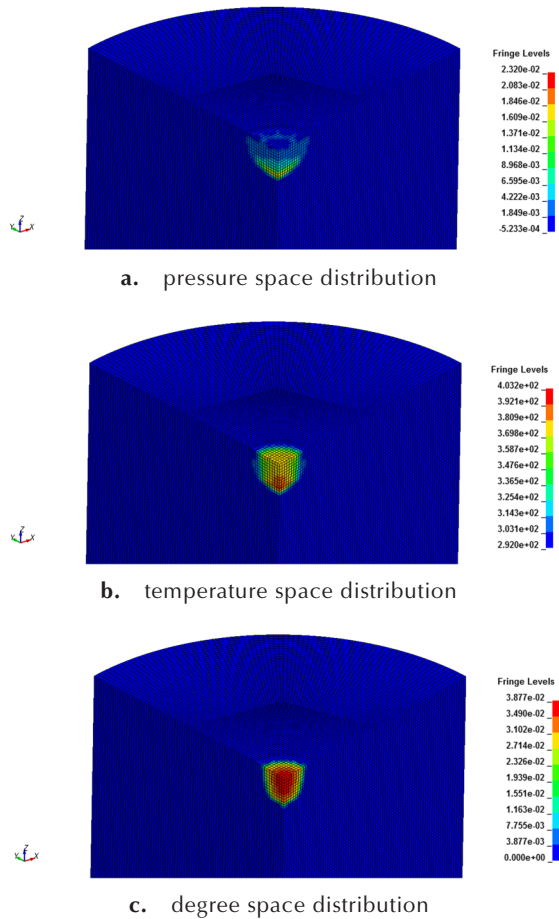


图2 500 m·s<sup>-1</sup>时压力、温度和反应度的空间分布

Fig.2 Space distributions of pressure, temperature and reaction degree at 500 m·s<sup>-1</sup>

### 2.2.2 压力、温度和反应度的时程分布

根据上述炸药压力、温度和反应度的空间分布规律, 对速度为 500~1500 m·s<sup>-1</sup> 的结果文件水射流头部前方炸药受冲击压缩处最危险单元进行分析, 得到炸药单元压力、温度和炸药反应度时程曲线, 如图 3 所示。

从图 3a 压力时程曲线中可以看出, 单元压力在水射流速度由 1000 m·s<sup>-1</sup> 转变为 1100 m·s<sup>-1</sup> 时发生的跳跃量明显比其他速度区间时发生的跳跃量大, 且水射流速度为 1100 m·s<sup>-1</sup> 时单元最大压力已接近 B 炸药爆轰压力 29.4 GPa<sup>[19]</sup>; 从图 3b 温度时程曲线中可以看出, 单元温度在水射流速度由 1000 m·s<sup>-1</sup> 转变为 1100 m·s<sup>-1</sup> 时发生的跳跃量明显比其他速度区间时发

生的跳跃量大, 且速度为 1100 m·s<sup>-1</sup> 时单元最高温度已超过 B 炸药临界温度 487 K<sup>[20]</sup>; 从图 3c 反应度时程曲线中可以看出, 单元反应度在水射流速度由 1000 m·s<sup>-1</sup> 转变为 1100 m·s<sup>-1</sup> 时发生质变, 其反应度随时间最终达到 1, 跳跃量明显高于其他速度时发生的跳跃量。

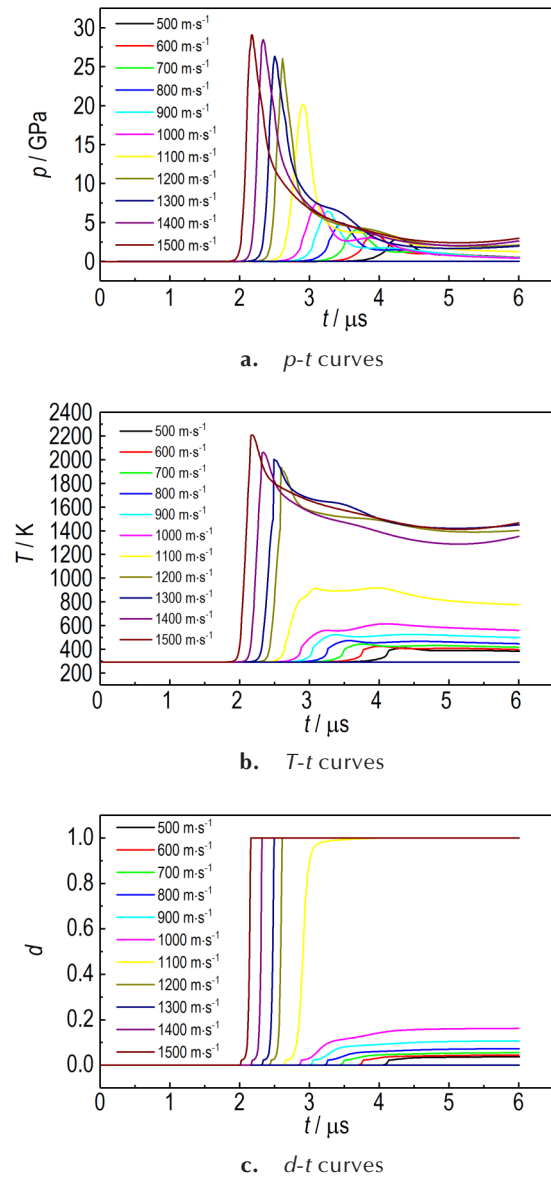


图3 最危险单元压力、温度和反应度时程曲线

Fig.3 Time-history curves of pressure, temperature and reaction degree of the most dangerous unit

### 2.2.3 安全性与水射流速度的关系

为更加清晰地找出安全性随水射流速度变化的规律, 在水射流速度 800~1100 m·s<sup>-1</sup> 范围内以 25 m·s<sup>-1</sup> 为步长进行进一步计算, 根据上述炸药单元压力、温度和炸药反应度时空分布规律, 将各个速度文件中最危



险单元最大压力  $p_{\max}$ 、最高温度  $T_{\max}$  和最大反应度  $d_{\max}$  导出, 绘制出图 4。

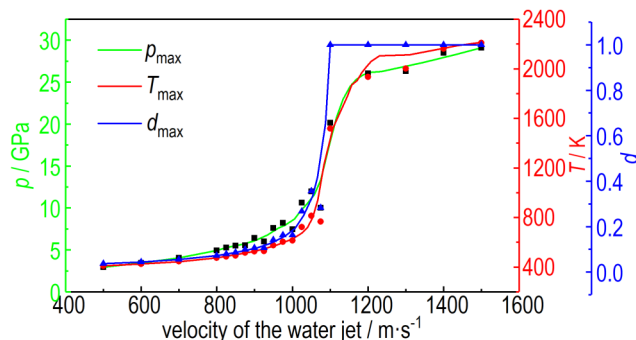


图 4 最大压力  $p_{\max}$ 、最高温度  $T_{\max}$  和最大反应度  $d_{\max}$  与水射流速度的关系

Fig. 4 Relationship of maximum pressure  $p_{\max}$ , maximum temperature  $T_{\max}$ , maximum reaction degree  $d_{\max}$  vs. velocity of the water jet

从图 4 中可以清晰地看出, 高压水射流破碎炸药过程可按水射流速度划分为 3 个范围。水射流速度为  $500\sim 800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 炸药最大压力较小且小于 B 炸药临界起爆压力  $5.63\text{ GPa}^{[19]}$ , 炸药最大压力随着水射流速度增加而增大的速率很小; 炸药最高温度较低且低于 B 炸药临界温度  $487\text{ K}$ , 炸药最高温度随着水射流速度增加而升高的速率很小; 炸药最大反应度很小且不超过  $0.075$ , 炸药最大反应度随着水射流速度增加而增大的速率极小。再分析图 3 参数时程曲线可知, 当水射流速度为  $500\sim 800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 炸药单元压力在峰值压力过后迅速回落至较低水平, 单元温度变化规律和单元反应度变化规律均为先升高随后缓慢下降, 温度缓慢下降的原因可能是高压水射流冲刷炸药的过程中, 热量不断从炸药中传递至水介质中, 并随着水介质被带走, 而温度缓慢下降进一步引起反应度下降。综合考虑压力、温度、反应度三个因素后认为, 在水射流速度为  $500\sim 800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 炸药并未发生反应, 所以该速度范围是较安全的。

在水射流速度为  $800\sim 1100\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 炸药最大压力超过 B 炸药临界起爆压力, 并随着水射流速度增加而迅速增大, 当水射流速度为  $1100\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 压力值已增大至  $20.2\text{ GPa}$ ; 炸药最高温度已超过 B 炸药临界温度, 且随着水射流速度增加而迅速升高, 当水射流速度为  $1100\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 温度已升高至  $917\text{ K}$ ; 炸药最大反应度随着水射流速度增加而急剧增大, 当水射流速度为  $1100\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 炸药反应度已经为 1。再分析图 3 参数时程曲线可知, 在水射流速度为  $800\sim 1100\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 炸药单元压力在峰值压力过后迅速回落至较高水

平并保持一段时间, 单元温度变化规律和单元反应度变化规律均为先升高随后保持在这个水平或略有升高。综合考虑压力、温度、反应度三个因素后认为, 水射流速度在  $800\sim 1100\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 炸药可能已经发生轻微反应, 所以该速度范围是危险的。

在水射流速度为  $1100\sim 1500\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 炸药最大压力继续随着射流速度增加而增大, 已接近 B 炸药的 CJ 爆轰压力值; 炸药最高温度则随着射流速度增加而继续快速升高, 但并未升至 B 炸药爆热值; 炸药反应度保持为 1。综合考虑炸药压力、温度、反应度各因素后认为, 在水射流速度为  $1100\sim 1500\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 炸药发生了爆轰反应, 该速度范围是极危险的。根据上述分析可知, 高压水射流速度小于  $800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时较安全, 可在此速度范围内对 B 炸药进行破碎。

### 3 高压水射流速度对过程有效性的影响

#### 3.1 有限元模型的建立

同样采取  $1/4$  结构进行建模, B 炸药采用 Lagrange 算法, 用三维实体 solid 164 单元进行描述, 而水射流采用 SPH 算法, 用 SPH 单元进行描述。B 炸药尺寸为  $\Phi 8\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ , 高速水射流尺寸为  $\Phi 1\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ , 水射流与炸药表面之间初始距离为  $0.5\text{ mm}$ 。在 TrueGrid 和 LS\_PrePost 中进行建模, 得到的计算模型如图 5 所示。

炸药采用各项同性随动硬化塑性材料模型进行描述, 水射流仍采用空材料模型, 采用格鲁尼森状态方程<sup>[21]</sup>进行描述。由上文结果可知, 水射流速度小于  $800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  为较安全范围区域, 因此高压水射流速度工况设置为  $0\sim 800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 以  $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  为步长进行计算。

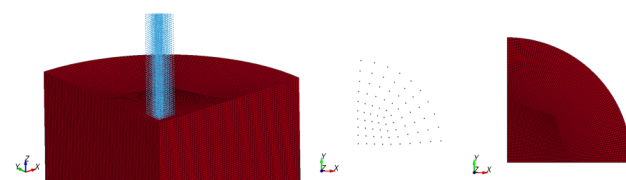


图 5 计算模型

Fig.5 Model used for calculation

#### 3.2 模拟结果与讨论

当炸药单元表现为失效而被删除时, 即视为炸药被水射流破碎。为衡量过程有效性, 对各个结果文件中  $t=105\text{ }\mu\text{s}$  时失效单元数目 (相当于炸药单元平均失效速度) 进行分析, 失效单元数目与水射流速度之间的关系如图 6 所示。

分析图6可知,当水射流速度低于 $350\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,失效单元数目与水射流速度大致呈线性递增关系,表明水射流速度越大,炸药单元失效数目越多,炸药的破碎效果随着水射流速度增大而变好,当水射流速度为 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,炸药失效单元数目为0,水射流无法破碎炸药,而当速度为 $350\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右时,炸药失效单元数目最多,破碎效率最好;当水射流速度为 $350\sim 400\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,失效单元数目与水射流速度呈锐减关系,表明水射流速度越大,炸药单元失效数目越少,炸药的破碎效率随着水射流速度增大而变差;当水射流速度为 $400\sim 800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,失效单元数目与水射流速度大致呈线性递增关系,但曲线斜率小于水射流速度低于 $350\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的曲线斜率,表明 $400\sim 800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时单位速度的增加引起的失效单元数目增加量小于水射流速度低于 $350\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内单位速度的增加引起的失效单元数目增加量。

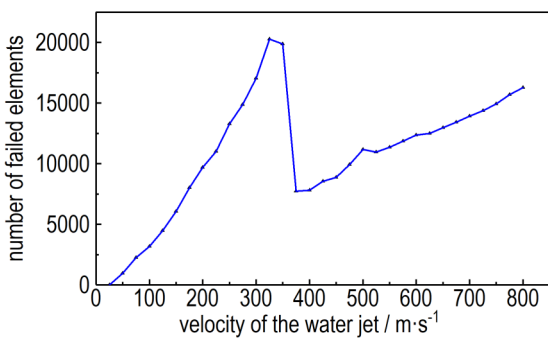


图6 失效单元数目与水射流速度之间的关系  
Fig.6 Relationship between the number of failed elements and the velocity of water jet

在LS\_PrePost中对比射流速度分别为 $300\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $400\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的模拟计算结果,如图7所示。分析发现:高压水射流速度为 $300\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,水射流作用炸药后,水柱周边的水粒子速度方向发生改变且以较大速度向四周迅速发散,并对炸药进行渗透,从而在较大截面积上对炸药实现破碎;当水射流速度为 $400\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,绝大多数水粒子围绕在水柱中心,水射流以典型蘑菇头状不断冲击炸药,在较小截面积上对炸药实现破碎。

由此可知,当水射流速度低于 $350\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,由于水粒子保持轴向稳定的能力较弱,从而造成水柱周边的水粒子向四周飞散,以一个较大的范围对炸药进行破碎,虽然速度较慢,但冲击面积较大,从而使得炸药失效单元数量较多;当水射流速度为 $400\sim 800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,由于水粒子保持轴向稳定的能力较强,使得绝大多

数水粒子围绕在水柱中心,以一个较小的范围对炸药进行破碎,虽然冲击面积较小,但冲击速度较大,从而使炸药失效单元数量较多。由上述分析可知,根据高压水射流破碎炸药的特点,高压水射流破碎炸药过程可按水射流速度划分为3个范围。当水射流速度低于 $350\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,可实现高压水射流在较大截面积上破碎炸药,认为该速度范围是大截面破碎范围;当水射流速度为 $400\sim 800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,可实现高压水射流在较小截面积上破碎炸药,认为该速度范围是小截面破碎范围;水射流速度在 $350\sim 400\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时为过渡范围。

根据高压水射流破碎炸药的破碎效率,可按水射流速度划分为两个范围。当水射流速度为 $150\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,高压水射流破碎炸药的效率与过渡范围中水射流速度为 $400\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时效率相当,因此,当水射流速度低于 $150\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围为低效率范围,而水射流速度 $150\sim 800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时为高效率范围。

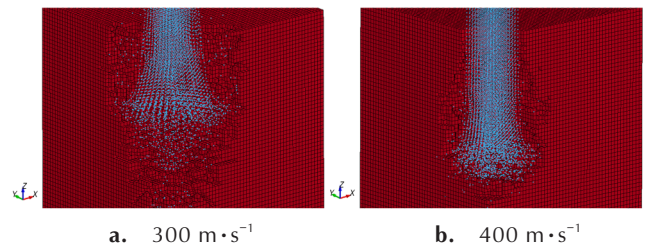


图7  $300\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $400\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 水射流速度破碎炸药效果的对比  
Fig.7 Comparison of the effects of breaking explosives by water jet velocity of  $300\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  and  $400\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

#### 4 结论

(1)高压水射流破碎B炸药过程的安全性,可按水射流速度划分为三个范围:低于 $800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 较安全, $800\sim 1100\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 较危险,高于 $1100\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 极危险。所以,可采用低于 $800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的高压水射流对报废弹药中装填的B炸药进行破碎,并能保证处理过程的安全性。

(2)水射流破碎B炸药过程有效性,可按水射流速度划分为两个范围:低于 $150\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为低效率范围, $150\sim 800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为高效率范围。当高压水射流速度为 $150\sim 350\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,能较高效地对报废弹药装填的B炸药进行大截面破碎;当水射流速度为 $400\sim 800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,能高效实现小截面破碎。

(3)对水射流破碎B炸药过程安全性和有效性的研究都是基于仿真计算,且未考虑弹药壳体外形及材

料对B炸药的影响,研究结果还是有一定的局限性。由于条件所限,未进行试验验证,研究结果可为高压水射流处理装填B炸药的报废弹药系统参数设计及优化作参考。

#### 参考文献:

- [1] 李金明,雷彬,丁玉奎.通用弹药销毁处理技术[M].北京:国防工业出版社,2012:42-63.  
LI Jin-ming, LEI Bin, DING Yu-kui. Technology of conventional ammunition disposal[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 42-63.
- [2] Fossey R D. The new generation water jet explosives cutting system[C]//The 12th International Symposium on Jet Cutting Technology, 1994: 691-698.
- [3] Burch D, Johnson M, Sims K. Value added products from reclamation of military munitions[J]. *Waste Management*, 1997, 17(2/3): 159-163.
- [4] Foldyna J, Hauner M, Sedlarik A. Utilization of water jets in ss-23 missiles dismantling[C]//The Conference of Jetting Technology, 1998: 485-489.
- [5] Nico H A van Ham. Recycling and disposal of munitions and explosives[J]. *Waste Management*, 1997, 17(2/3): 147-150.
- [6] Przemysław Borkowski, Józef Borkowski, Dariusz Wozniak. Examination of high-pressure water jet usability for high explosives (HE) washing out from artillery ammunition[J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2008, 5(2): 21-35.
- [7] Shyman L, Ustimenko Y. Disposal and destruction processes of ammunition missiles and explosives, which constitute danger when storing[J]. *Counteraction to Chemical and Biological Terrorism in East European Countries*, 2009, 121(2): 147-152.
- [8] 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 water jet cutting parametrization test for simulated material of explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2001, 9(1): 24-27.
- [9] 钟树良.水射流切割炸药的技术研究[D].绵阳:中国工程物理研究院,2006.  
ZHONG Shu-liang. Technical research on the cutting of explosive by water jet[D]. Mianyang: China Institute of Engineering Physics, 2006.
- [10] 钟树良,李振泉,等.水射流切割炸药的安全性及试验研究[J].理论与探索,2006(3):44-46.  
ZHONG Shu-liang, LI Zhen-quan. Safety and experimental research of water jet cutting explosives[J]. *Theory and Exploration*, 2006(3): 44-46.
- [11] 罗同杰,张保良.高压水射流技术倒出弹体装药的试验研究[J].中北大学学报(自然科学版),2014,35(2):122-126.  
LUO Tong-jie, ZHANG Bao-liang. Experimental study on emptying explosive of projectile with technology of high pressure water jet[J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2014, 35(2): 122-126.
- [12] 何远航,李海军,张庆明.高压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.  
HE Yuan-hang, LI Hai-jun, ZHANG Qing-ming. Numerical simulation of the interactions between hyperpressure waterjet and explosive[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2005, 19(2): 169-173.
- [13] 黄亨建,董海山,张明.B炸药的改型研究及其进展[J].含能材料,2001,9(4):183-186.  
HUANG Heng-jian, DONG Hai-shan, ZHANG Ming. Numerical simulation of the interactions between hyperpressure waterjet and explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2001, 9(4): 183-186.
- [14] Urtiew P A, Vandersall K S, Tarver C M, et al. Shock ignition experiments and modeling of Composition B and C-4[C]//Proceeding of the 13th International Detonation Symposium, Norfolk, Virginia, USA, 2006: 929-939.
- [15] Tarver C M, Hallquist J O, Erickson L M. Modeling short pulse duration shock initiation of solid explosives[C]//Proceeding of the 8th International Detonation Symposium, Naval Surface Weapons enter, Albuquerque, NSWC MP 86-194, 1985: 929-939.
- [16] Hallquistjo. LS-DYNA theory manual: Version971 [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2007: 15. 19-15.22.
- [17] 崔凯华.高能炸药冲击起爆数值模拟[D].绵阳:中国工程物理研究院,2010.  
CUI Kai-hua. Numerical Simulation of impact initiation of high energy explosives[D]. Mianyang: China Institute of Engineering Physics, 2006.
- [18] 薛胜雄.高压水射流技术工程[M].合肥:合肥工业大学出版社,2006:33-53.  
XUE Sheng-xiong. High pressure water jet technology engineering [M]. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2006: 33-53.
- [19] 张宝钲,张庆明,黄风雷.爆轰物理学[M].北京:兵器工业出版社,2001:156-166.  
ZHANG Bao-ping, ZHANG Qing-ming, HUANG Feng-lei. Detonation physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 156-166.
- [20] 钟一鹏,胡雅达,江宏志.国外火炸药性能手册[M].北京:兵器工业出版社,1990:117-121.  
ZHONG Yi-peng, HU Ya-da, JIANG Hong-zhi. Foreign explosives performance manual [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990: 117-121.
- [21] 时党勇,李裕春,张胜民.基于ANSYS/LS-DYNA 8.1进行显式动力学分析[M].北京:清华大学出版社,2005:216-249.  
SHI Dang-yong, LI Yu-chun, ZHANG Sheng-min. Explicit Dynamics Analysis Based on ANSYS/LS-DYNA 8.1 [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 216-249.

## Numerical Simulation for the Process of Breaking Explosives by High Pressure Water Jet

HUANG Yu-ping<sup>1</sup>, CUI Qing-zhong<sup>1</sup>, XU Yang<sup>1</sup>, CHEN Ming-hua<sup>2</sup>, WU Xing-yu<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Institute of Special Services, Army Academy, Shijiazhuang 050000, China; 3. Beijing Auxin Chemical Technology Ltd, Beijing 100040, China)

**Abstract:** To apply the high pressure water jet technology to the engineering practice of waste ammunition treatment project, the process of breaking explosives by high pressure water jet was studied by the numerical simulation method. A finite element calculation model with high pressure water jet velocity as the input parameter was set up. The Lagrange algorithm and SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) algorithm were used to solve the problem by DYNA solver. The safety for the process of breaking explosives by high pressure water jet was studied through the analysis of pressure, temperature and reaction degree of explosive, and the effectiveness for the process of breaking explosives by high pressure water jet was analyzed through the number analysis of failure unit. Results show that when the velocity of high pressure water jet is lower than  $800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the high pressure water jet can be used to break the charge of waste ammunition explosive, and ensure the safety of the breaking process. When the velocity of high pressure water jet is  $150 \sim 350 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the large cross-section breaking can be performed more effectively; when the velocity of high pressure water jet is  $400 \sim 800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the small cross-section breaking can be realized efficiently.

**Key words:** high pressure water jet; explosive; numerical simulation

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2018213

(责编:王艳秀)