文章编号：1000-5773(2005)02-0169-05

高速水射流与凝聚炸药相互作用的数值模拟*

何远航，李海军，张庆明

（北京理工大学爆炸与安全科学国家重点实验室，北京 100081）

摘要：利用 LS-DYNA3D 软件并采用 Lagrange 算法，对 500 m/s 的高速水射流与凝聚炸药的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。数值模拟的结果与理论分析的结果之间具有很好的一致性。模拟结果表明，在高速水射流与凝聚炸药相互作用的过程中，凝聚炸药药柱截面上的压力随径向距离的增加而降低；药柱中的最大压力出现在水射流头部附近或水射流头部的前方。

关键词：数值模拟；高速水射流；压力分布；压力历史

中图分类号：O358 **文献标识码**：A

1 引 言

水射流拆弹作为一门新兴的拆弹技术，受到了越来越多国家的重视。为了高效率地拆除大尺寸弹药，有必要利用超高压水射流发生装置所形成的高速水射流来对弹体进行切割。由于在炸药相关作业过程中存在着相当的危险性，因此需要对高速水射流与凝聚炸药相互作用的过程进行深入的研究，以便为水射流拆弹作业的安全设计和操作规范提供理论指导。

对于高速水射流与凝聚炸药的相互作用过程，现有的理论研究只能给出一些定性的分析结果；另一方面，基于目前对高速水射流的认识程度以及实验测试技术的发展水平，在相应的实验研究中也存在许多暂时无法克服的困难。相对而言，在理论研究的基础上运用数值模拟的方法来进行分析研究，则可获得许多有用的信息，并且能够为实验研究提供一些理论依据。

2 相互作用过程的理论分析

根据应力波理论[1]，可将高速水射流与凝聚炸药的相互作用过程分为两个阶段，即动态加载过程和准静态加载过程。

当高速水射流液滴刚接触到凝聚炸药表面时，凝聚炸药的状态参数会发生突变。此时，由于高速水射流的作用，在凝聚炸药中会形成应力波（或冲击波），该应力波（或冲击波）的作用将产生通常所说的水锤压力，这个过程是一个动态加载过程。根据国外相关文献的报道[2]，水锤压力作用在炸药表面的持续时间仅为微秒量级，然后水锤压力就会迅速衰减并基本稳定在某一压力水平。水锤压力所维持的时间主要取决于液滴的大小及水射流的速度；如果液滴越小，或者水射流的速度越大，则水锤压力作用的时间就越短。假设凝聚炸药为刚性材料，且 ρ、c、v 分别为高速水射流的密度、声速和速度，则水锤压力的大小可以由下式确定

* **收稿日期**：2004-03-05；**修回日期**：2004-06-22

基金项目：国家自然科学基金(10172019)

作者简介：何远航(1964—)，男，博士，副教授，主要研究方向：爆轰物理、冲击动力学. E-mail：heyuanhang@263.net

$$p_1 = \rho c v \tag{1}$$

在实际应用中,通常根据(1)式来粗略估算水锤压力。

随着高速水射流对凝聚炸药继续作用,水射流开始侵彻凝聚炸药。在水射流侵彻凝聚炸药的过程中,未侵彻凝聚炸药中的状态参数缓慢而连续地变化,因此这是一个准静态加载过程。在这一过程中,水射流对凝聚炸药的连续冲击压力正是水锤压力衰减后的结果,它不仅取决于水射流的速度,而且取决于凝聚炸药力学特性。在准静态加载过程中,高速水射流作用在凝聚炸药表面后,其速度会发生改变。根据动量守恒,截面为 S 的水射流对凝聚炸药的总打击力 F 为[3]

$$F = \rho v S (v - v' \cos\beta) \tag{2}$$

式中:β 为射流方向变化的角度,v' 为反射后水流的速度,它们的大小主要取决于水射流与凝聚炸药的相互作用情况。连续冲击压力 p_2 即是打击力作用在凝聚炸药表面上所产生的压强

$$p_2 = F/S = (v - v' \cos\beta)\rho v \tag{3}$$

p_2 的大小反映了水射流对材料的破坏能力。当水射流在物体表面发生完全反射时,反射水射流的速度大小不变,但方向和原方向正好相反,因此打击力达到最大值,同时水射流对炸药的冲击压力也达到最大值。假设在离开喷嘴后直到与炸药相互作用之前,水射流的运动速度和射流直径的大小都不发生变化,则此时连续冲击压力的大小为 $2\rho v^2$。

3 计算模型的建立

利用 LS-DYNA 软件[4]并采用 Lagrange 算法,对高速水射流与凝聚炸药的相互作用过程进行了数值模拟。在计算模型中包括高速水射流和凝聚炸药两种材料,高速水射流尺寸为∅1 mm×10 mm,凝聚炸药柱尺寸为∅10 mm×20 mm,高速水射流与凝聚炸药表面之间的距离为 5 mm,高速水射流与凝聚炸药柱处于同一轴线上。考虑到实际物理模型的对称性,对整个计算模型采取 1/4 结构进行建模和求解,同时加上对称边界约束,这样可以大大缩短运算时间。

对于凝聚炸药,采用以网格为基础的 Lagrange 方法来进行建模。Lagrange 方法能够清晰地定义材料的边界和不同材料的界面,并且给出很好的时间历程信息。单元类型选 SOLID164,采用弹塑性流体动力材料模型(* MAT-PLASTIC-ELASTIC-HYDRO)来定义凝聚炸药材料,凝聚炸药的材料参数和状态方程选用类 PETN 炸药的参数,反应速率选用点火增长模型。

由于水射流具有流动性,因此在水射流与凝聚炸药的相互作用过程中必定会发生网格扭曲,为此,对高速水射流采用 SPH(Smoothing Particle Hydrodynamics)方法进行建模。SPH 方法是一种无网格的 Lagrange 方法,它通过在相互作用物体的几何体中填充 SPH 粒子的方法来替代传统的网格划分。SPH 方法的主要优点是不必采用数值网格来计算空间问题,这样不仅可以避免在冲击加载的 Lagrange 分析中经常发生的严重的网格混乱和网格畸变等问题,而且还能清晰地描述材料界面的作用行为。在本文的计算中,对高速水射流采用空材料模型(* MAT-NULL)以及线性多项式状态方程,SPH 粒子之间间距为 0.2 mm。

4 模拟结果的分析

4.1 不同时刻的压力分布

我们对 500 m/s 的高速水射流侵彻凝聚炸药的过程进行了数值模拟,图 1 给出了不同时刻药柱内的压力分布特征。

由于 500 m/s 的高速水射流在凝聚炸药中的侵彻速度小于凝聚炸药的声速,因此当水射流刚接触炸药时,会在炸药中形成一个应力波。计算结果表明,当 t=10.289 μs 时,炸药表面处的最大压力可达 1.1 GPa,其出现在水射流头部与凝聚炸药的接触点处。当水射流侵彻炸药时,炸药中的压力将有所减弱;在 t=11.684 μs 时,炸药中最大压力只有 528 MPa,其出现在水射流头部与凝聚炸药的混合处。随着水射流持续侵彻炸药,在炸药中传播的应力波将出现追赶和叠加,使得炸药中的最大压力值会逐渐增大;当 t=13.749 μs 时,炸药中的最大压力为 601 MPa;另外,从炸药侧部出现的压力变化区可以判定,

此时凝聚炸药中的横向应力波已经传至药柱的侧部；根据药柱的半径可以算出该炸药的横向声速为 1 333 m/s。当 $t=16.942$ μs 时，在炸药柱的底部会出现一个明显的低压区，这是应力波在炸药底部反射后所形成的稀疏波在药柱中传播的结果；根据药柱的长度可以算出炸药的纵向声速为 2 881 m/s。当 $t=16.942$ μs 时，药柱中的最大压力已达 2.1 GPa，其出现在水射流头部前方 5 mm 处；当 $t=18.338$ μs 时，炸药中的最大压力达到最大值 2.97 GPa，其大致出现在水射流头部前方 10 mm 处。随后，由于稀疏波的影响，炸药中的压力会逐渐减小。在 $t=21.299$ μs 时，炸药中的最大压力已降低到 1.74 GPa；此时，药柱也发生了明显的变形，药柱在宏观尺度上的最终表现将是碎裂。

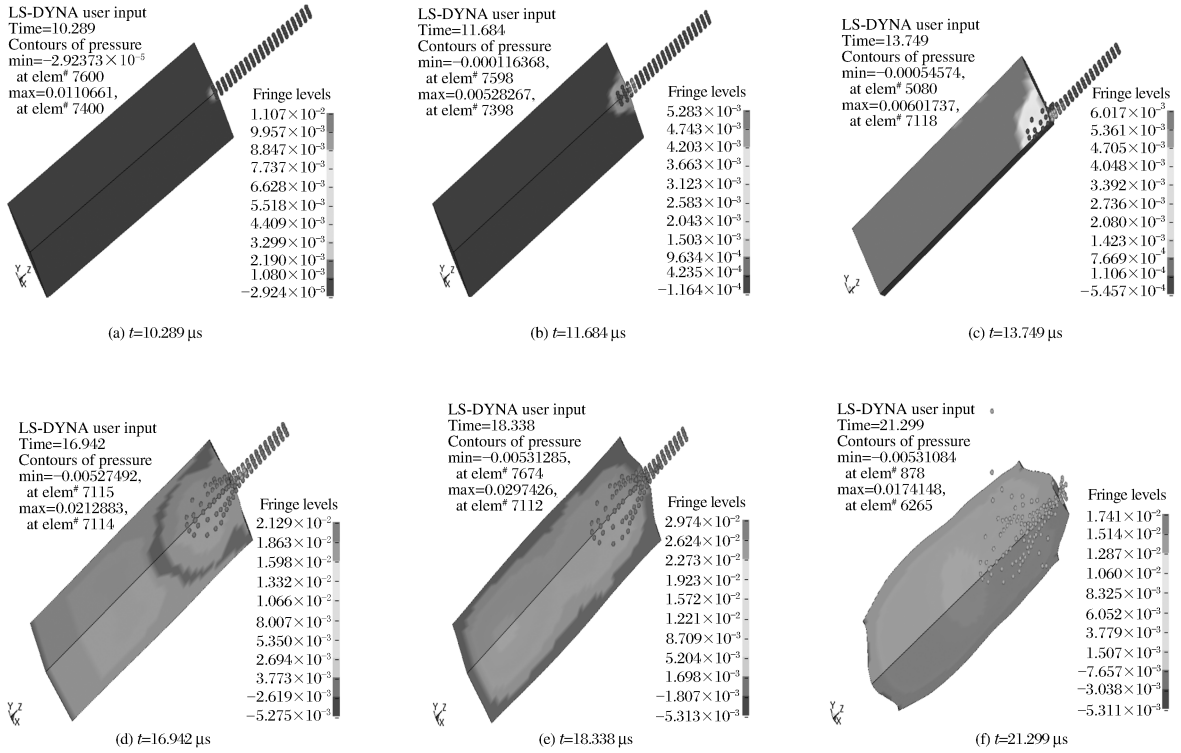


图 1　不同时刻凝聚炸药中的压力分布

Fig. 1　Pressure distributions in the explosive at different times

另外，当横向声速 c_s 和纵向声速 c_l 被确定以后，由下式可以计算出炸药的体声速 c_b

$$c_b=\sqrt{c_l^2-\frac{4}{3}c_s^2} \tag{4}$$

把所获得的横向声速 $c_s=1\,333$ m/s 以及纵向声速 $c_l=2\,881$ m/s 代入上式，可以算出本工作所选炸药的体声速为 $c_b=2\,435$ m/s。

4.2　不同单元的压力历史

选取炸药上表面（水射流入射面）中心到边缘之间的三个单元 7 400、960、680，分别计算了这三个单元在水射流侵彻过程中的压力变化规律，相应的压力历史曲线可见图 2。从图 2 中可看出，离炸药轴心越远的位置，炸药单元所受的压力越小，这是表明应力波在传播过程中会发生衰减；从 680 单元的压力历史曲线还可看出，在炸药的边缘处还会存在一定大小的拉应力。

图 3 给出了凝聚炸药对称轴上不同深度处单元的压力历史。从图 3 中可看出，炸药中的最大压力并不一定出现在水射流与凝聚炸药接触的初期，最大压力有可能是水射流前方应力波叠加所形成的压力；应力波在凝聚炸药下表面反射后将在炸药中产生稀疏波，使得凝聚炸药的底部所受压力变得很小。

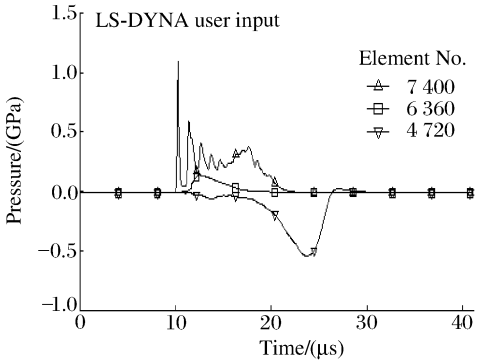


图 2 药柱上表面不同径向位置处的压力历史

Fig. 2 Pressure history of the elements on the upper surface of the explosive

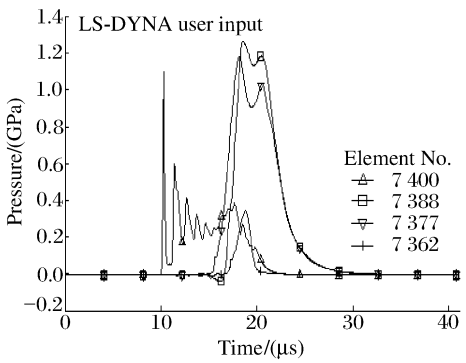


图 3 药柱对称轴上不同深度处的压力历史

Fig. 3 Pressure history of the elements on the symmetrical axes of the explosive

4.3 数值模拟与理论分析的比较

为了将数值模拟的结果与理论分析的结果进行比较，选取凝聚炸药上表面中心处的单元 7 400 来进行分析，该单元的压力历史如图 2 和图 3 中所示。从图中可看出，在 500 m/s 的高速水射流的冲击下，炸药上表面中心处的压力峰值可以达到 1.0 GPa，且能维持 1 μs 左右，然后将迅速衰减并大致稳定在 250 MPa 的水平。根据理论分析结果，水锤压力应该出现在水射流与凝聚炸药接触初期，其持续时间为微秒量级；在 500 m/s 高速水射流的作用下，由(1)式所计算出的水锤压力为 720 MPa，由(3)式所得到的最大连续冲击压力为 500 MPa。由此可以看出，本工作的数值模拟结果与理论分析所揭示的规律具有很好的一致性，表明本工作数值模拟所采用的 Lagrange 方法以及材料模型和状态方程可以用来很好地模拟高速水射流与凝聚炸药的相互作用过程。另外，本工作数值模拟得到的水锤压力大于理论分析的结果，这表明水锤压力的大小不仅取决于水射流的速度和声阻抗，而且还取决于水射流与凝聚炸药之间的阻抗匹配关系。

5 结 论

对高速水射流与凝聚炸药的相互作用过程进行了数值模拟和理论分析，得出以下结论：

(1) 高速水射流与凝聚炸药的相互作用可分为动态加载过程和准静态加载过程两个阶段；水锤压力的大小不仅取决于水的密度、声速、速度，而且还取决于材料之间的阻抗匹配；连续冲击压力的最大值为 $2\rho v^2$。

(2) 所采用的数值模拟方法可以很好地模拟高速水射流与凝聚炸药的相互作用过程，所选类 PETN 凝聚炸药的横向声速为 1 333 m/s，纵向声速为 2 881 m/s，体声速为 2 435 m/s。

(3) 在凝聚炸药药柱同一截面上，离轴心越远，所受压力越小；药柱侧部存在拉应力。

(4) 在 500 m/s 的高速水射流的作用下，凝聚炸药内部的最大压力值出现在水射流的头部或水射流头部的前方。

References:

[1] Wang L L. The Foundation of Stress Wave [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1986. 18－24. (in Chinese)
王礼立. 应力波基础[M]. 北京：国防工业出版社，1986. 18－24.

[2] Tikhomirov R A. High-Pressure Jet Cutting [M]. New York: ASME, 1992. 47－49.

[3] Xue S X. The Technology and Application of High-Pressure Waterjet [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1998. 32－34. (in Chinese)

薛胜雄. 高压水射流技术与应用[M]. 北京：机械工业出版社，1998. 32－34.

[4] Jiang W C，Ding G Y. The Arithmetical Foundation and Applied Method of ANSYS/LS-DYNA Code[Z]. Beijing：ANSYS/LS-DYNA Technological Instructed Center，the Department of Mechanical and Electrical Engineering，Beijing Institute of Technology，1998. 149－151. (in Chinese)
蒋维城，丁刚毅. ANSYS/LS-DYNA 程序算法基础和使用方法 [Z]. 北京：北京理工大学机电工程系 ANSYS/LS-DYNA 中国技术支持中心，1998. 149－151.

Numerical Simulation of the Interactions between Hyperpressure Waterjet and Explosive

HE Yuan-Hang，LI Hai-Jun，ZHANG Qing-Ming

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

Abstract：The interactions between the high-speed waterjet of 500 m/s and the condensed explosive have been simulated by LS-DYNA3D code with Lagrange method. The pressure distributions in the explosive at different times and the pressure histories at different elements of the explosive have been calculated. On the basis of numerical simulation，the sound speeds of the explosive have been determined. The numerical simulation results accord with the theoretical analysis. During the process of the interaction between the high-speed waterjet and the condensed explosive，the numerical simulation results show that the pressure decreases with the increase in the radial distance of the element and the maximum pressure occurs nearby or in front of the head of the penetrating waterjet.

Key words：numerical simulation；high-speed waterjet；pressure distribution；pressure history

《高压物理学报》再次被确定为物理类核心期刊

2004 年，《高压物理学报》再次被确定为物理类核心期刊，并入编 2004 版《中文核心期刊要目总览》，该书于 2004 年 7 月由北京大学出版社出版。此版《中文核心期刊要目总览》按《中国图书分类法》的学科体系，列出了 75 个学科的核心期刊表。

核心期刊缘起于 1934 年英国文献计量学家布拉德福发现的文献分布特点，其经典的表示就是，专业论文绝大多数集中在少数专业期刊之中。核心期刊的评选工作，是运用科学方法对各种刊物在一定时期内所刊登论文的学术水平和学术影响力进行综合评价的一种科研活动，北京高校图书馆期刊工作研究会成员馆、中国科学院文献中心、中国社会科学院文献中心、农业科学院文献中心、中国人民大学书报资料中心等相关单位的百余名专家和期刊工作者参加了研究，近两千名学科专家参加了 2004 版核心期刊评审。

2004 版核心期刊研究被列为“2001 年国家社会科学基金项目”，本版核心期刊评选采用了被索量、被摘量、被引量、它引量、被摘率、影响因子、获国家奖或被国内外重要检索工具收录等 7 个评价指标。《高压物理学报》被确定为物理类核心期刊。

由北京大学图书馆主持的核心期刊评选工作自 1992 年开始、每四年举行一次，《高压物理学报》已连续四次被评为物理类核心期刊。在此，编辑部谨向厚爱《高压物理学报》的作者、读者以及为本刊文章严格把关的专家学者致以诚挚的感谢！