

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.02.014

圆锥罩聚能射流形成过程的数值模拟

曹丽娜¹, 韩秀清¹, 董小刚¹, 张永光²

(1. 长春工业大学 基础科学学院, 吉林 长春 130012; 2. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要: 针对聚能装药爆破存在的问题, 提出一种利用计算机对聚能装药爆破进行数值模拟的方法。通过有限元显式动力分析软件的显式算法对石油射孔弹圆锥型聚能装药爆破形成射流的过程进行数值模拟, 分析了圆锥型聚能装药的射流速度的分布特性, 并与带外壳的聚能装药的射流过程的模拟结果进行了对比。计算结果与圆锥型聚能射流的物理现象和规律相吻合, 说明该计算模型和模拟方法合理、可行, 对石油射孔弹生产及科研有一定的借鉴作用。

关键词: 有限元分析; 聚能装药; 聚能射流; 数值模拟

中图分类号: TP69; N945.12 **文献标识码:** A

Numerical Simulation of Conical Shaped Charge Jet Formation Process

CAO Li-na¹, HAN Xiu-qing¹, DONG Xiao-gang¹, ZHANG Yong-guang²

(1. School of Basic Science, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: A numerical simulation method by computer is present in order to solve the problem during the shaped charge blasting. Numerical simulation of the conical shaped charge jet formation process is made by use of the explicit dynamic finite element analysis program. The distribution character of velocity of shaped charge jet is analyzed, and the results between shelled model and no shell one are compared. The results of numerical simulation are in agreement with physical phenomena and laws of jet formed by conical shaped charge blasting. The study indicates that the calculation model and simulation method are reasonable and feasible, which may be a reference to manufacture and scientific research of perforating bullet.

Keywords: Finite element analysis; Shaped charge; Shaped charge jet; Numerical simulation

0 引言

圆锥罩聚能装药是常见聚能装药的一种, 是一端装有内凹金属罩(药型罩)的装药, 在另一端引爆后, 爆轰波从药型罩顶部掠至尾部时, 将金属罩以很快的速度向轴向挤压, 使之变形并在轴线处发生碰撞、挤压^[1], 同时, 在碰撞高压的作用下汇成一股连续高速金属流, 即聚能射流。在石油开采中, 利用它在极短的时间内(微妙级或毫秒级)把井筒环境与地层环境相互沟通, 形成有效的流油通道。由于爆炸实验费用昂贵, 过程复杂, 同时测量手段和观测条件也限制了爆破的试验研究。利用流体力学和动力学模型来描述射流的过程需要综合化学反应方程、热传导方程、材料本构关系等, 这些方程只有在极其简化的情况下才能取得解析解, 因此误差会很大, 甚至不能准确反映爆轰过程。而数值解对控制方程的限制却宽得多, 可以得到更接近实际情况的解。因此, 利用计算机对聚能装药爆破进行数值模拟成为了一种重要而有效的研究方法^[2]。故

运用大型有限元软件做前处理, 利用通用显式动力分析程序对圆锥型聚能装药射流进行仿真模拟。

1 分析模型的建立

1.1 基本假设

所采用的有限元显式动力分析软件的显式算法特别适合于分析此类高度非线性的复杂力学过程, 以真实地反映药型罩的压垮、射流形成及断裂的过程。在对射孔弹实体模型进行分析的基础上, 给出如下基本假设: 炸药、药型罩和外壳都是均匀连续介质, 整个爆炸过程为绝热过程, 计算采用顶部中心点起爆, 装药结构是严格的轴对称结构。

1.2 几何模型

以工程普遍使用的石油射孔弹为例, 设装药高度 41.5 mm, 罩锥角 64°, 罩壁厚 1.5 mm, 其截面尺寸如图 1 (由于结构的对称性, 取一半分析), 在此先忽略射孔弹外壳对聚能射流的影响, 装药为 32 g RDX 炸药。

收稿日期: 2009-09-31; 修回日期: 2009-11-16

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目“射孔枪现代设计技术在海洋石油开发中的应用”(2006AA09Z326); 吉林省科技发展计划资助项目“高孔密型石油射孔枪现代设计技术的研究”(20060535)

作者简介: 曹丽娜(1982-), 女, 硕士研究生, 从事有限元法的工程应用研究。

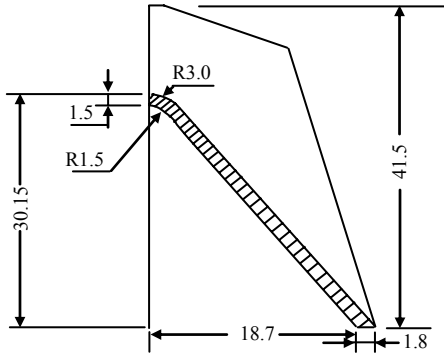


图 1 截面尺寸(单位: mm)

1.3 材料模型

在聚能装药射流的数值模拟中, 涉及到炸药、药型罩 2 种材料模型。

1) 炸药: 程序已提供 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 高能炸药材料模型, 爆轰产物的压力与体积关系用 JWL 状态方程, 其一般形式:

$$p_s = A \exp(-R_1 V) + B \exp(-R_2 V) + C V^{-(\sigma+1)}$$

$$E_s = \frac{A}{R_1} \exp(-R_1 V) + \frac{B}{R_2} \exp(-R_2 V) + \frac{C}{\sigma V^\sigma}$$

式中: p_s 为等熵压力, E_s 为等熵比热力学能, V 是爆轰产物的相对体积, A 、 B 、 C 、 R_1 、 R_2 为待定常数。

2) 药型罩: 用 STEINBERG 本构模型和 GRUNEISEN 状态方程来描述, 而 GRUNEISEN 状态方程为:

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (s_1 - 1) \mu - s_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - s_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + a \mu) E$$

其中, c 是 $v_s - v_p$ 曲线 (即剪切-压缩波速曲线) 的截距, s_1 、 s_2 和 s_3 是 $v_s - v_p$ 曲线的斜率系数,

γ_0 是 GRUNEISEN 常数, a 是 γ_0 和 $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ 的一阶体积修正量。

1.4 建立有限元模型

射流形成的数值计算过程包括聚能装药的爆轰、药型罩的压垮、射流的初步形成以及拉伸 3 个过程。这 3 个过程与采用的圆锥形药型罩具有轴对称特点, 可简化为二维轴对称问题。计算模型使用 SOLID162 单元进行网格划分, 炸药和金属罩之间的接触使用 CONTACT_2D_AUTOMATIC_

SURFACE_TO_SURFACE 接触^[3], 金属罩自身的接触使用 CCONTACT_2D_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE 算法。由于药型罩在爆炸作用下形成射流的过程中存在大变形、大应变, 使用 LAGERANGE 算法会造成单元严重畸变, 因此需要使用自适应网格。其有限元模型如图 2。

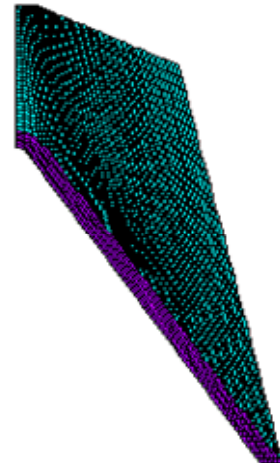


图 2 有限元模型

2 聚能射流形成过程的数值模拟

由于圆锥形聚能装药具有轴对称的特点, 在中心点起爆条件下, 球面爆轰波从起爆点传播, 经过一定时间, 波阵面到达聚能罩顶端。波阵面继续向前运动, 聚能罩开始压垮运动。不考虑外壳及聚能罩反射, 从起爆点向外传播的总是规则的球面波, 依照爆轰波到达罩壁的各部分的次序, 罩壁各部分先后依次运动, 依次进入对称轴线, 在对称轴线附近, 由于药型罩表面激烈变形和碰撞, 产生了聚能射流。图 3 为聚能射流形成过程的几个典型的瞬态。

从图 3 可以看出, 射流及杆体是随时间而增长的, 直到射流断裂。图 3(a) 表示炸药的初始状态; 图 3(b) 表示起爆后 10 μs 时药型罩的变形图, 在爆轰产物的作用下药型罩向对称轴线运动、碰撞, 射流头部已经形成; 图 3(c) 表示在 20 μs 时药型罩的变形情况, 此时炸药基本爆轰完毕, 对射流的形成影响很小, 因此删除炸药 PART 和炸药与金属药型罩间的接触^[4], 而药型罩向轴线闭合运动时, 由于金属质量收缩到直径较小的区域, 因此罩壁必然冲厚, 从而使罩内表面的速度大于外表面的速度。在轴线碰撞时, 罩内壁部分得到极大的加速, 成为射流, 外壁部分速度大为降低成为杆体; 图 3(d) 表示 36 μs 时射流的形成情况, 这时射流有一定程度的断裂, 在射流断裂后, 各小段射流的长度不再发生变化, 继续运动时, 隔断射流间距逐渐加大。

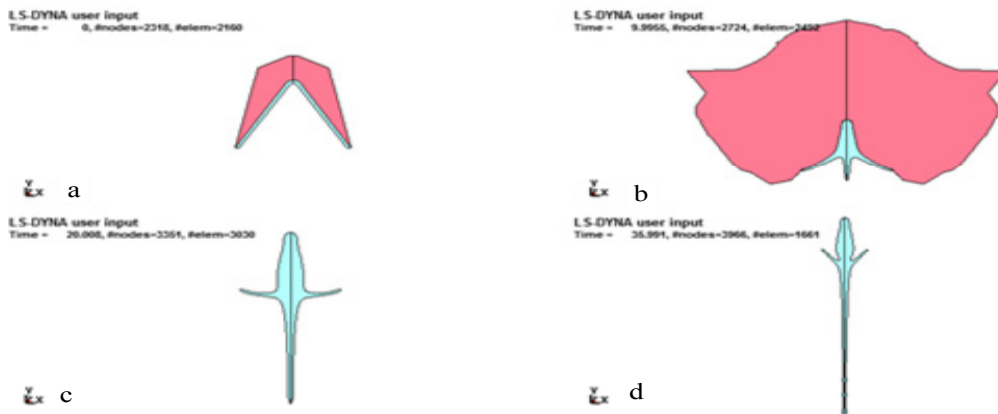


图 3 圆锥型聚能射流形成过程

3 射流参数分布特征

由数值模拟后, 处理程序的 Y—速度等值线图如图 4, 可以看出, 射流断裂的时间大约在 32~34 μs 之间, 而且射流断裂时, 射流头部速度为 4 512 m/s, 此后射流继续在轴线处碰撞、挤压, 射流头

部速度先增大后减小, 直到 50 μs 时, 射流头部速度是 4 518 m/s。34 μs 和 50 μs 时 Y—速度云图如图 4。在 34 μs 时, 通过鼠标在后处理程序的图形显示区点选射流头部实体, 编号 18, 得到 18 号节点 Y 方向速度随时间变化曲线, 如图 5。

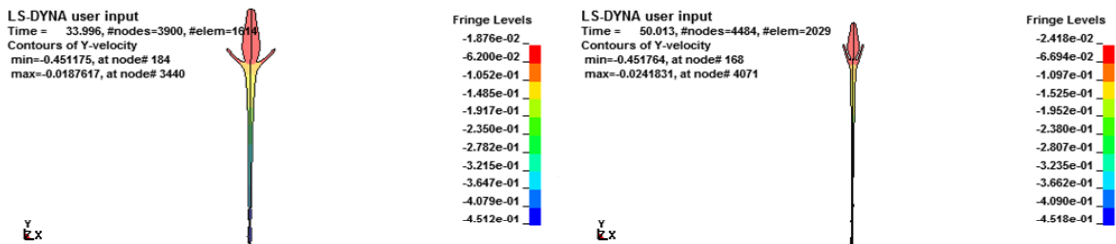


图 4 34 μs 和 50 μs 时 Y—速度云图

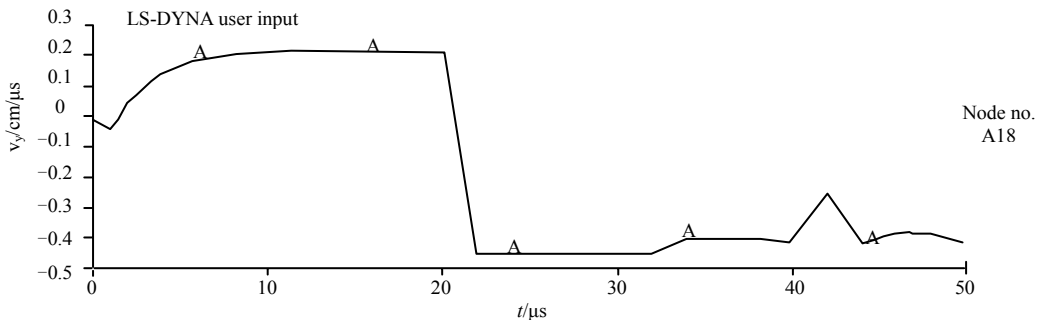


图 5 NODE18 的 Y 速度—时间曲线

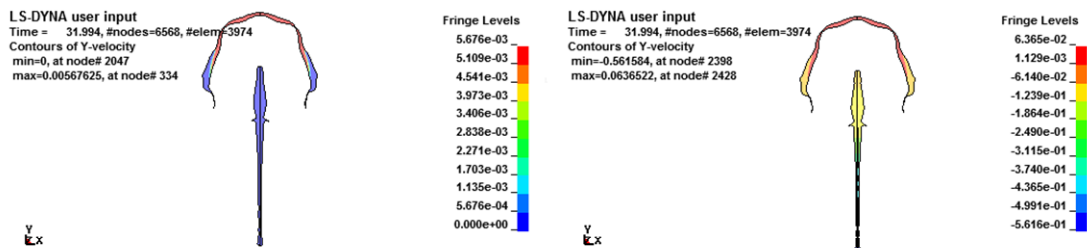


图 6 32 μs 时 Mises 等效应力云图和 Y—速度云图

由于实际使用的聚能装药绝大部分都带有钢质外壳, 为了更真实地反映石油射孔弹聚能装药爆炸后, 药型罩在爆轰产物驱动下聚能射流的形成过程,

将带外壳的射孔弹再进行数值模拟。选取弹壳为 45 号钢, 材料模型用 JOHNSON-COOK 本构模型和 GRUNEISEN 状态方程来描述。

(下转第 54 页)

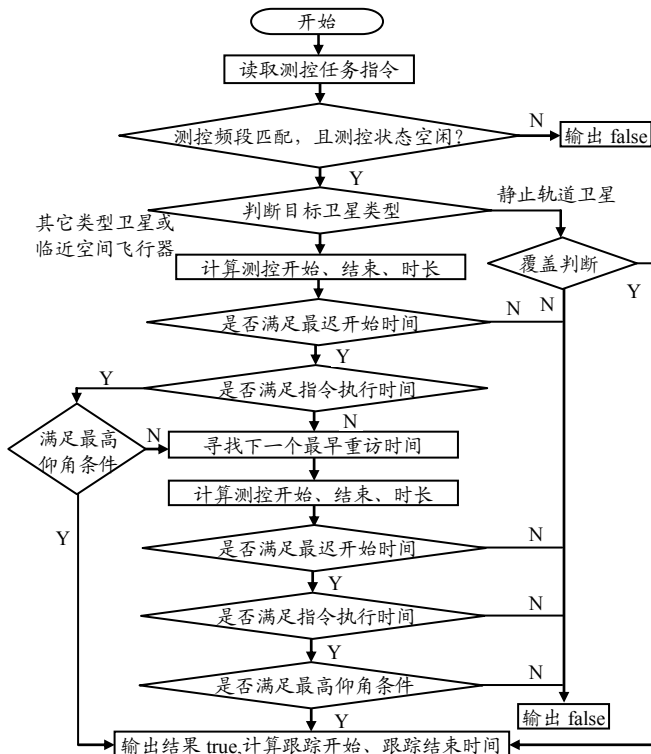


图 3 地面站测控支持判断流程图

参考文献:

[1] 孙平. 空间作战飞行器测控指挥任务建模与仿真研究 [D]. 湖南: 国防科学技术大学硕士学位论文, 2005.

[2] 杨永安, 樊恒海. 一种基于ES法的卫星测控资源调度仿真及实现[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(4): 982-985.

[3] 闫钧华. 分布式测控系统任务调度研究[D]. 江苏: 南京航空航天大学博士学位论文, 2004.

(上接第 45 页)

模拟结果显示: 射流断裂的时间在 30~32 μs 之间, 射流断裂时, 射流头部速度为 5616 m/s, 射流断裂后, 射流继续在轴线处碰撞、挤压, 但是射流头部速度在 5620 m/s 附近小幅度变化, 射流形状有较大差别, 表现为带外壳的射流“两翼”较小, 且壳体有较严重的变形。图 6 为 32 μs 时 Mises 等效应力和 Y—速度云图, 上面部分是变形后的壳体。

4 结束语

数值计算结果符合圆锥型聚能射流的物理现象和规律。通过对没有外壳的模型和带外壳的模型分别进行数值计算, 结果表明: 带外壳的药型罩的聚合速度远大于不带外壳的罩的聚合速度^[5]。原因是带外壳后减弱了稀疏波的作用, 增加了作用在聚能罩上的有效药量。这样的模拟结果与现有理论相吻合, 说明采用的计算模型和数值模拟方法是正确的。利用有限元显式动力分析软件的显式算法模拟圆锥

型聚能射流形成过程, 可较方便地改换“试验”条件和参数。结合数学与力学分析方法, 为聚能装药的优化设计提供了经济、快捷、有效的研究方法。

参考文献:

[1] 恽寿榕, 赵衡阳. 爆炸力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

[2] 郝莉, 王成, 宁建国. 聚能射流问题的数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(1): 19-21.

[3] 史党勇, 李裕春, 张胜民. 基于ANSYS/LS-DYNA8.1进行显式动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[4] 章媛. 线型聚能装药射流形成及侵彻钢板的数值模拟[J]. 科技情报开发与经济, 2006, 23(16): 181-182.

[5] 王兴雁, 孙强, 张可玉, 等. 带壳聚能装药射流参数计算[J]. 青岛大学学报, 2001, 16(2): 85-89.

(上接第 50 页)

1) 软性导热硅胶绝缘垫: 片状材料, 可根据发热器件功率的大小及形状裁切, 具有良好的导热能力和绝缘性其导热系数, 可达 1.75~2.75 W/(m.K), 其作用就是填充发热功率器件与散热器之间的间隙, 将发热功率器件的热量有效迅速地传递给散热器。其工艺厚度为 0.5~5.0 mm, 工作温度在 50~20℃, 又因其柔软而富有弹性, 还能起减震、密封等作用, 能满足设备小型化、超薄化的设计要求。

2) 导热硅脂: 一种呈膏状、粘度很高的散热铺剂, 表面常有一层硅油保护, 高温时融化呈液态, 可流动填补界面空间, 以提高散热效果, 常涂敷在大功率器件与散热器之间, 导热系数高于软性导热硅胶绝缘垫, 通常可达到 4.0~5.5 W/(m.K)。

4 结论

热设计的好坏直接影响到设备工作的稳定性、可靠性和品质指标。

参考文献:

[1] 王健石, 朱东霞. 电子设备热设计速查手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.

[2] 王健石, 电子设备结构设计标准手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.

[3] 杨洪海. 电子设备的散热问题与新型冷却技术的应用[J]. 新技术新工艺, 2006(5): 71-72.

[4] 谭昌谣, 王钧石, 等. 实用表面工程技术[M]. 北京: 新时代出版社, 1998.

[5] 陆延孝, 郑鹏洲, 等. 可靠性设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

[6] 李富成. 流体力学机械[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1980.

[7] SJ20275-92. 军用电子设备热设计指南[S].