聚能火工装置工作过程数值模拟

夏晓宇，黄敏超
(国防科技大学 航天与材料工程学院，湖南 长沙 410073)

摘 要：采用ALE算法模拟了聚能火工装置的工作过程。仿真结果能够演示聚能射流的形成过程，并且能够揭示一些有关材料和射流的特性和规律，符合现有实验结论并与相关文献结论一致。表明该模拟方法合理可行，可应用于聚能火工装置优化设计。

关键词：火工装置；聚能射流；数值模拟；ALE
中图分类号：V435 **文献标识码**：A **文章编号**：(2010)01-0050-05

Numerical simulation of the working process of a shaped charge pyrotechnics

Xia Xiaoyu, Huang Minchao
(Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The working process of a shaped charge jet pyrotechnics is simulated with the ALE method. Simulation results can demonstrate the shaping process of the shaped charge jet, and they can also show some rules and characteristics of the shaped charge jet. The results agree with the existing experimental outcomes and the references. It shows that the simulation method is reasonable, so it could be used in the optimization design of the shaped charge jet pyrotechnics.

Key words: pyrotechnics; shaped charge jet; numerical simulation; ALE

0 引言

聚能火工分离装置是航空航天领域应用较广的一类火工装置，其基本形状是将内装有猛炸药的金属管拉制成截面呈倒V字形的细长条。作用原理是：当聚能装药起爆后，金属罩在爆炸作用下压垮，爆炸产生的高温高压气体和金属气化产物形成高速“刀片”状射流，具有较强的切割能力。聚能火工装置具有能量大、能切割多种结构

收稿日期：2009-09-27；**修回日期**：2009-11-12。

作者简介：夏晓宇（1984—），男，硕士，研究领域为宇航推进理论与工程。

万方数据

及材料等优点，是应用较早较多的线型分离装置，如应用于美国“阿特拉斯-人马座”火箭、“土星 V”号火箭上的绝热隔板分离，以及固体火箭发动机推力终止装置[1]。

由于聚能射流的研究涉及到炸药的爆轰过程及材料在高温、高压及高应变率下的大变形等复杂力学问题，难以用传统的力学公式来描述，解析方法所涉及的范围非常有限，因此人们对聚能火工分离装置的研究以经验设计和试验验证为主。随着计算机技术和仿真方法的发展，数值模拟已经成为了一种重要研究手段。利用有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA，以固体火箭发动机推力终止装置上的聚能分离装置为研究对象进行建模，对其工作过程进行仿真，并与现有实践结论进行对比分析，验证了模型的合理性和算法的可行性，为新型聚能火工装置的开发提供了一种高效便捷的辅助设计手段。

1 数学模型

1.1 有限元计算方程

在爆炸冲击环境中，通常把结构用有限元离散化，其有限元方程表示为：

$$M\ddot{x}(t)+C\dot{x}(t)+F(x,\dot{x})=P(x,t)+H \tag{1}$$

式中，M 为总质量矩阵；P 为总体载荷矢量；F 为单元应力场等效节点力矢量组；H 为总体结构沙漏粘性阻尼力；C 为结构阻尼系数；$\ddot{x}(t)$ 为总体节点加速度矢量；$\dot{x}(t)$ 为总体节点速度矢量。

动力平衡方程的数值解法采用直接积分法，时间积分采用显式中心插分法。

1.2 ALE 方法

ALE 方法最早是为了解决流体问题而引入的，它可以克服单元严重畸变引起的数值计算困难，很好地处理整个物体发生空间位移及本身发生大变形的问题，并实现流-固耦合的动态分析。ALE 算法分为 3 步：(1) 显式 Lagrange 计算，即只考虑压力梯度分布对速度和能量改变的影响，在动量方程中压力取前一时刻的量，因此是显式格式；(2) 用隐式格式解动量方程，而把 (1) 求得的速度分量作为迭代求解的初始值；(3) 重新划分网格和网格之间输运量的计算。ALE 将连续体在初始时刻 t_0 的构形记为 Ω_X，将 t 时刻的构形记为 Ωx，ALE 描述引入了一个可以独立于初始变形和现时构形的参考构形，记为 $\Omega\varepsilon$。为了确定参考构形中各参考点的位置，引入参考坐标 $O\varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3$，参考构形中各点的位置由其在参考坐标中的位置矢量 ε 确定。ALE 描述下的随体导数可写为

$$\left.\frac{\partial F}{\partial t}\right|_X=\left.\frac{\partial F(\varepsilon,t)}{\partial t}\right|_\varepsilon+c_i\frac{\partial F}{\partial x_i} \tag{2}$$

F 为某一物理量，$c_i=u_i-w_i$ 为 ALE 描述下的对流速度，其中 u_i 为质点 X 的物质速度，w_i 为参考点 ε 的物质速度，亦即网格速度。

在爆炸分析过程中，炸药可视为流体，采用 ALE 网格，结构采用 Lagrange 网格，便于观察受力变形及破坏情况。

1.3 材料状态方程

炸药采用高能炸药材料模型和 JWL 状态方程，JWL 状态方程精确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，表达式为：

$$P=A\left(1-\frac{W}{R_1v}\right)\exp(-R_1v)+B\left(1-\frac{W}{R_2v}\right)\exp(-R_2v)+\frac{WE}{v} \tag{3}$$

式中，v 为相对体积；E 为单位体积炸药初始内能；A、B、R_1、R_2、W 为自定义输入参数，均为无量纲量。

药型罩金属采用流体弹塑性模型，使用 Gruneisen 状态方程来描述药型罩在爆轰波作用下的动力响应行为，可用来模拟高应变(>10^5)条件下的材料变形问题，其在压缩状态时的表达式为：

$$P=\frac{\rho_0C^2\mu\left[1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{a}{2}\mu^2\right]}{\left[1-(S_1-1)\mu-S_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\frac{\mu_3}{(\mu+1)^2}\right]}+(\gamma_0+a\mu)E_0 \tag{4}$$

式中，C 为 v_s-v_p(剪切-压缩波速)曲线的截距；S_1、S_2、S_3 为 v_s-v_p 曲线的斜率系数；γ_0 为 Gruneisen 常数；ρ_0 为正常状态下介质的密度；

万方数据

a 是 γ_0 和 $\mu=\frac{\rho}{\rho_0}-1$ 的一阶修正量。

为了模拟射流形成和流动过程，射流流经的空气区域采用 Linear Polynomial 状态方程，形式如下：

$$P=C_0+C_1\mu+C_2\mu^2+C_3\mu^3+(C_4+C_5\mu+C_6\mu^2)E \quad (5)$$

式中，$\mu=\frac{\rho}{\rho_0}-1$，$\frac{\rho}{\rho_0}$ 为当前密度与初始密度之比；C_0~C_6 为参数；E 为初始内能。

2 有限元模型及求解设置

2.1 有限元模型的建立

由于对称性，可截取聚能分离装置的一小段来进行分析，利用 ANSYS 前处理器建立有限元模型并划分网格如图 1：

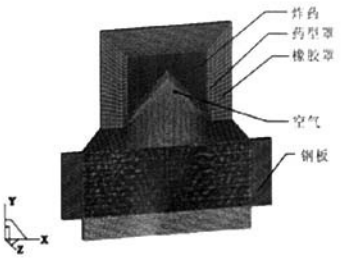

图 1 聚能火工装置有限元模型

Fig.1 Finite element model of the shaped charge pyrotechnics

模型采用 cm-g-μs 单位制，其中材料模型及参数分别为：

装药为某塑性炸药，密度为 1.66g/cm³，爆速为 8204m/s，爆压 27GPa，选用高能炸药模型 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN；药型罩材料为紫铜，密度为 8.96g/cm³，剪切模量为 47.7GPa，采用 MAT_JOHNSON_COOK 材料模型，该模型适用于材料具有较大范围应变率的情况；橡胶密度为 1.15g/cm³，泊松比为 0.499。采用 MAT_MOONEY-RIVLIN_RUBBER 材料模型；待切割材料为 45# 钢板，密度为 7.83g/cm³，泊松比为 0.3，抗拉强度为 600MPa，屈服点为 355MPa，弹性模量为 207GPa，失效应变为 0.75%。采用带失效模式的塑性随动模型 MAT_PLASTIC_KINEMATIC，当单元应变达到失效应变时，单元判断为失效并从材料里删除；空气区域采用空材料模型 MAT_NULL。

共建立 5 个 PART，PART1 为炸药，PART2 为药型罩，PART3 为橡胶罩，PART4 为空气区域，PART5 为钢板。PART1、PART2、PART3、PART4 在边界上共节点，均采用多物质 ALE 单元；PART5 为 LAGRANGE 单元。所有单元均为 8 节点 6 面体实体单元。

2.2 求解设置

通过关键字设置 ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP 定义多物质材料组，包括 PART1、PART2、PART3、PART4，使得在同一个 ALE 网格中，可以包含多种材料的物质，从而实现物质在网格中的输运过程。

通过关键字设置 SET_PART_LIST 定义 PART 组，将 ALE 单元的 PART1、PART2、PART3、PART4 定义为一个 PART 组，PART5 单独定义为一个 PART 组。

添加关键字 CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 设置待切割钢板与射流流体之间的耦合。

在模型的前后两侧面上施加对称约束，定义起爆点为炸药顶部中心点。求解时间 20μs，每隔 0.2μs 输出一个结果文件。

3 结果与讨论

使用后处理器 LS-PREPOST 察看结果文件，图 2 为炸药沿顶部中心起爆后，爆轰波向下传播的过程：

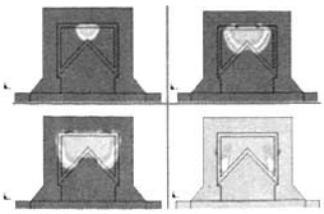

图 2 爆轰波向下传播过程

Fig.2 Detonation wave downward transfer process

万方数据

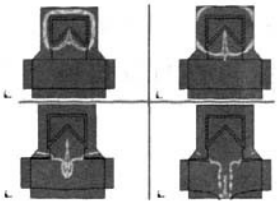

图 3 聚能射流的形成和向下侵彻

Fig.3 Shaping process and downward penetration of the shaped charge jet

由图 2 可以看到，爆轰波以球面波的形式向下传播，一直到药型罩顶部，形状基本保持不变。与文献 [3] 的分析相一致。

不同时刻的射流形状如图 3，通过观察可看到，药型罩在爆轰波作用下被压垮，形成高温高压的“刀片”状金属射流向下侵彻。射流的切割过程中，由于受到钢板的阻碍，射流头部由尖锐变得扁平，并且射流在运动过程中被拉伸拉断，射流残渣散布于切口两侧。

图 4 是钢板在射流侵彻作用下切割分离的过程和钢板分离后的切口形状。

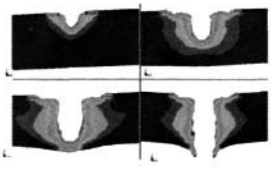

图 4 钢板的侵彻破坏过程

Fig.4 Penetration damage process of the steel plate

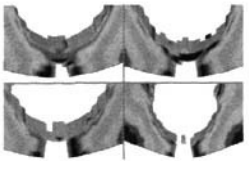

图 5 钢板下部的脆性断裂过程

Fig.5 Brittle fracture process at the bottom of the steel plate

可以看到，射流侵彻初期，切口比较平滑，形状比较规则。随着射流的进一步深入，切口两侧出现了不规则的小坑。这是由于在侵彻的后期，由于钢板的阻碍，射流的速度大大降低，钢板强度的作用越来越明显，后续射流赶上前面的已经释放能量的射流残渣，并作用在残渣上继续进行侵彻。由于存在残渣的堆积，从而使得两侧出现了许多不规则小坑。这一点，与文献 [3] 的结论相符合。

在试验过程中发现，在射流切割分离钢板的过程中，前期作用过程是由于高温高压的射流侵彻所致，在后期过程中，钢板的分离则有一定的脆性断裂的效果。仿真结果模拟出了这一现象，如图 5 所示。

在射流流经区域自上到下依次取 A、B、C、D、E、F 6 个观察节点，由于是固定网格，故可以观察不同时刻射流在这些节点处的速度。

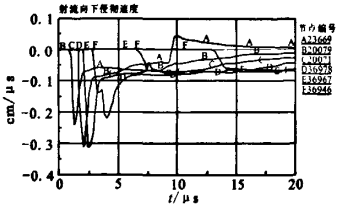

图 6 观察节点处的射流速度曲线

Fig.6 Jet velocity at observed points

由图 6 可看出，对于任一固定节点，射流速度先增至最大，然后逐渐减小，说明射流头部速度最大，由头部至尾部速度变小，与文献 [4] 中的结论相一致。

射流在 B、C 节点处的速度最大可达约 3100m/s，在 D、E 节点处，速度曲线有波折，这是因为射流在运动过程中不断拉伸，拉伸到一定程度时会出现不连贯甚至断裂的现象[3]，因此当射流前部到达节点 D、E 时，速度达到一个小高峰，然后由于射流的不连贯，在钢板的阻碍下，速度有所回落，直至后续射流跟上，速度得以继续增加。

4 结束语

以固体火箭发动机推力终止装置上的聚能爆破打开装置为研究对象，建立了有限元模型。

（下转第 57 页）

万方数据

配方、化铣温度和时间。

经过大量试验和研究，我们研制出了金属板片化铣配方，该配方含有：腐蚀剂、缓蚀剂、稳定剂、老化剂、促进剂等化学成分。在有效时段之内，其化学活性是稳定和持续的。

5 结束语

光刻工艺技术成功应用于层板喷注器所需的金属板片和膜片阀所需的金属膜片加工，其技术指标达到了设计要求，并已应用于实际生产。

光刻技术随着光刻理论以及光刻装备的不断发展，也在不断升级和发展，随着 193nm、157nm 及其更短波长的准分子激光光刻技术、同步辐射 X 射线光刻技术、极紫外光刻技术、电子束/离子束投影光刻技术的应用，光刻技术水平将会迈进纳米世界。

参考文献：

[1] 宁建华. 光刻技术在流体动力密封研究中的应用[J]. 火箭推进, 2005, 31(4): 41-43.

[2] 宁建华. 光刻膜片在膜片阀中的应用 [J]. 火箭推进, 2005, 31(1): 33-34.

[3] 宁建华. 微推进与 MEMS 技术 [J]. 火箭推进, 2002, 28 (3): 11-16.

[4] 宁建华. 光刻技术在液体火箭发动机中的应用[J]. 火箭推, 1992, (4): 74-77.

[5] 宁建华. 微型胶体推力室阵列研究 [J]. 火箭推进, 2004,30(增刊): 60-66.

[6] 宁建华, 雷娟萍. 光刻技术在整体式层板催化剂床中的应用[J]. 火箭推进, 2006, 32(6): 43-47.

[7] 庄同曾, 张安康, 黄兰芳. 集成电路制造技术--原理与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 1987.

[8] 电子工业半导体专业工人技术教材编写组. 半导体化学[M]. 上海: 上海科学技术交流文献出版社, 1983.

（编辑：陈红霞）

（上接第 53 页）

运用 ALE 算法对其进行了数值模拟，并对计算结果进行了分析，分析结果与文中所引文献相一致，与现有理论相符合。这说明，数值模拟方法实用性强，对于航天分离火工装置的设计和其它工程实践，提供了一种方便、有效的研究手段和方法。

参考文献：

[1] 王凯民, 温玉全. 军用火工品设计技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

[2] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[3] 吴硕, 杨清文, 杨玉林, 刘鹏. 线性聚能装药切割钢靶的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2006, 29(3): 77-80.

[4] 李裕春, 吴腾芳等. 线型聚能装药射流形成过程的数值模拟[J]. 解放军理工大学学报（自然科学版）. 2002, 03 (3): 71-75.

[5] 曹德青, 恽寿榕. 用 ALE 方法实现射流侵彻靶板的三维数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2000, 20(2): 45-49.

[6] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

（编辑：王建喜）

万方数据