

冲击载荷作用下容器壳体动态响应的初步数值研究*

张亚军^a 岳鹏涛^a 徐胜利^a 张鹏^b

(a 中国科技大学力学和机械工程系 合肥 230026)

(b 中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘 要 本文针对带椭球封头的爆炸容器, 黑索今(RDX)在中心处的爆炸用点爆炸模型描述, 利用四阶 Runge-Kutta 法求解一组常微分方程得到爆炸近场的自相似解。采用有限体积形式的 PPM 格式求解轴对称 Euler 方程, 得到了容器内冲击波传播及其演化的图象。以计算得到的冲击载荷为基础, 修改 HONDO 程序, 壳体弹塑性模型采用 J_2 流动理论描述。对冲击波和壳体的耦合作用进行了初步的数值研究。计算结果表明: 容器内爆炸冲击波和壳体中应力波的传播及其演化与物理上的定性分析结果是一致的。由于应力波传播速度较冲击波快, 因此, 在冲击波未到达的静止流场, 流场出现扰动声波, 并向中心传播, 封头顶点附近出现最大变形。在中等载荷作用下, 可忽略壳体变形对流场的影响。

关键词: 自相似解, 有限元, 有限差分, 冲击波, 数值模拟。

1 引 言

爆炸容器在爆炸加工、废弃弹药处理和核武器部件试验等方面有着广泛的应用^[1], 其工作过程主要包括: 炸药爆炸、冲击波传播、冲击波与壳体结构的强耦合作用。炸药爆炸通常作点爆炸处理, 其爆炸场可由自相似解给出。冲击波在容器内部的传播以及冲击波与壳体的耦合作用, 需进行数值研究。在本文中, 冲击波传播的图像采用 PPM 格式求解轴对称 Euler 方程得出。采用有限元方法求解壳体在冲击载荷作用下的动态响应, 壳体变形对流场的影响是本文研究的对象。由于问题的复杂性, 此前做法是: 将爆炸场模拟与壳体动态响应问题分开研究, 即所谓的解耦方法。该方法实质是忽略壳体变形对爆炸场的影响, 即: 进行爆炸场计算时认为壳体壁面是刚性的, 而计算壳体动态响应时简化了爆炸载荷计算, 载荷大小和作用方式采用经验公式或实验数据。例如: 朱文辉^[2]用 TVD 格式计算冲击波流场, 但未研究壳体结构的动态响应。钟方平^[3]采用分段解耦的思想, 用 NND 格式求解冲击波流场, 用 ADINA 软件对四节点壳单元进行有限元分析, 得到壳体的动力学响应, 但未考虑壳体和流场之间的耦合。张鹏^[4]采用 PPM 格式计算爆炸冲击波流场, 虽然用 HONDO 程序计算了厚壁壳体中应力波的传播, 但未计及壳体变形对爆炸场的影响。

因此, 本文的目的是采用强耦合的方法, 研究中等载荷作用下壳体的动态响应问题, 并比较强耦合和解耦两种方法所得结果的差别。具体的方法是: 在壳体内壁面处, 令壳体运动速度和气体的法向速度相等, 气体切向速度采用插值得到。压力和温度法向导数均取为零。计算中, 流场网格取 128×230 , 壳体网格取 358×5 。

2 问题的描述和控制方程

2.1 问题的描述

图 1 (a) 给出了本文采用的爆炸容器结构示意图。壳体材料为普通碳素钢。取初始时圆柱内半径为参考尺寸, 其无量纲尺寸见图 1 (b)。其中圆柱部分直径为 426mm, 壁厚为 9.8mm, $t=0$ 时, 1g 黑索金 (RDX) 在容器中心处瞬时爆炸。其中, RDX 爆热为 5395J/g。本文的问题是: 求解炸药爆炸产生冲击波传播和冲击载荷作用下壳体的动态响应。

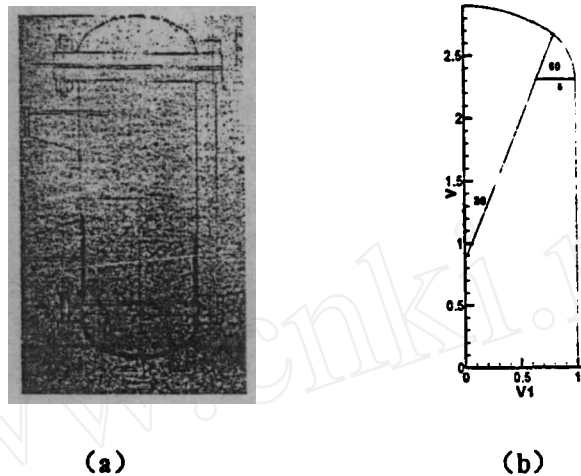


图 1 爆炸容器结构示意图(取自原设计图纸)及无量纲尺寸

2.2 控制方程和边界条件

2.2.1 爆炸场的控制方程

若点爆炸场是自模拟的, 则一维不定常流体力学方程组可简化为一组常微分方程组^[5], 采用四阶 R-K 方法求解, 可得到点爆炸自相似解。以该解作为爆炸中场数值解的初始条件。爆炸中场的控制方程可用下列轴对称 Euler 方程描述:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial r} + \frac{\partial G(U)}{\partial z} = H(U, r) \quad (1)$$

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ E \end{pmatrix}, \quad F(U) = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ u(E + p) \end{pmatrix}, \quad G(U) = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ v(E + p) \end{pmatrix}, \quad H(U, r) = -\frac{u}{r} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ E + p \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中 ρ 、 p 、 E 分别代表密度、压力以及单位体积总能, u, v 分别表示径向 r 和轴向 z 的速度分量。气体状态方程为

$$p = (\gamma - 1) \left[E - \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) \right] \quad (3)$$

其中 γ 为比热比。

2.2.2 壳体结构响应的控制方程

在体力 and 表面力作用下, Euler 空间中的控制体 V 的运动可用虚功原理^[5]来描述:

$$\delta\pi = \int_V \rho_s \ddot{x}^k \delta x_k dV + \int_V t^{km} \delta x_{k,m} dV - \int_V \rho_s f^k \delta x_k dV - \int_{\varphi} s^k \delta x_k dA \quad (4)$$

其中等号右边第一项表示惯性力的虚功, 第二项表示内应力的虚功(即虚应变能), 第三项表示体力的虚功, 第四项表示表面力的虚功。积分在当前位置上进行, ρ_s 为壳体质量密度, \ddot{x}^k 为加速度, t^{km} 为 Cauchy 应力(当前位置上的应力), f^k 是当前位置上的体力密度, s^k 是作用在 φ^1 上的表面力。

运用 Gauss 定理, 方程 (4) 可简化为:

$$\int_V (\rho_s \ddot{x}^k - t_{,m}^{km} - \rho_s f^k) \delta x_k dV + \int_{\varphi_0} (t_+^{km} - t_-^{km}) n_m \delta x_k dA + \int_{\varphi_1} (t^{km} n_m - s^k) \delta x_k dA = 0 \quad (5)$$

当且仅当各积分项为零时, 方程 (5) 才成立。可得运动方程表达式:

$$t_{,m}^{km} + \rho_s f^k = \rho_s \ddot{x}^k \quad \text{in } V \quad (6)$$

其它两个被积函数为零表示边界条件。

3 数值方法

描述点爆炸的常微分方程组采用四阶 Runge-Kutta 法求解。爆炸中场的控制方程计算采用有限体积形式的 PPM 格式^[6], 计算网格是任意四边形网格。壳体结构响应的计算采用基于四边形等参元的有限元方法, 求解方程 (6), 塑性计算采用了增量法^{[7][8]}, 具体细节见文献^[7]。

4 结果与讨论

图 2 给出了容器内爆炸场的压力等值线分布。图 2 中无量纲时间 t 是以自相似解结束时计及。尽管壳体很薄, 但 1g 黑索金爆炸产生的冲击波所造成壳体位移和变形仍然较小。图 2 中不能明显地看出壳体内边界的变形, 但清楚地反映了爆炸冲击波的传播以及波系结构的演化。图 2 (a) 表明: 当 $t = 0$ 时, 利用点爆炸自相似解得到的冲击波和稀疏波的波阵面均为球面, 冲击波传播的流场数值解正是以此为初始条件的。当 $t > 0$ 时, 用 PPM 格式计算冲击波传播流场。图 2 (b) 表明: 随着计算时间的推进, 冲击波自容器中心继续

向外传播。冲击波和稀疏波的波阵面仍为球面。这时启动 HONDO 程序。计算壳体的动态响应。图 2 (c) 表明：冲击波到达壳体内壁面后，出现规则反射，应力波在壳体中传播，并造成壳体的振动，由于壳体很薄，加上应力波传播速度快，因此，壳体中应力波传播过程难以分辨。若加厚壳体，文献^[7]反映了壳体中应力波的传播过程。从图 2 (c) 中还可清楚地看出壳体的振动所产生稀疏波和压缩波相间的扰动波，其等压线表现为细长的带状，并向容器中心传播。随着时间的推进，冲击波反射点沿壳体内壁面不断上移，反射冲击波也向中心方向传播。图 2 (e) 表明：反射冲击波向心传播时遇到中心低密度区，形成了向外传播的二次冲击波。壳体振动产生的扰动波也与冲击波发生相互作用。图 2 (f) 表明：反射冲击波与二次冲击波相互透射，同时透射冲击波沿 z 轴发生反射。流场波系结构变得复杂。图 2 (g) 2 (h) 表明：二次激波和反射冲击波相互透射，并产生了马赫反射。此后流场的波系结构变得更加复杂。

图 3 给出了对应图 2 的壳体内边界变形的放大图 (100 倍)，总的说来封头顶点附近的应变和位移最大。在冲击载荷作用下，圆柱壳体部分不同时刻的变化幅度不太大，基本上是在平衡位置附近作小幅振动，但是振动频率比封头处要高。封头顶点附近的位移 (包括应变) 幅度最大，因此，该处的振动对流场产生的扰动也较大，这也是壳体最容易发生破坏的地方，这与文献^[9]的实验结果也是一致的。

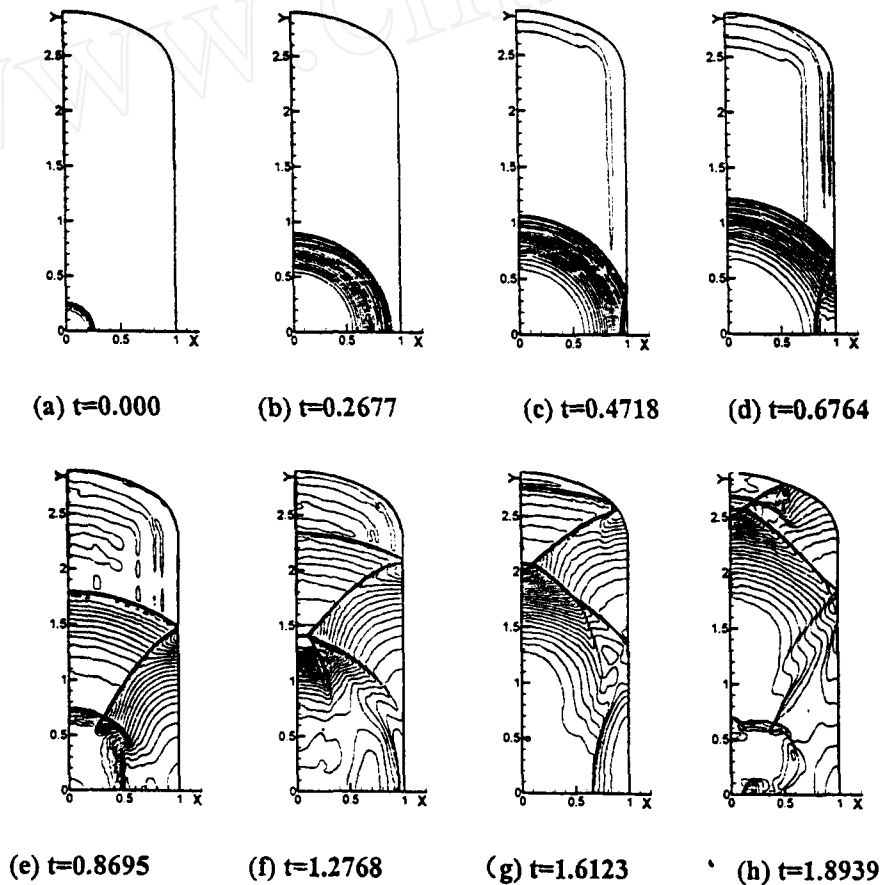


图 2 爆炸流场压力等值线 (点装药, 椭球封头超炸容器)

图 3 (a)、3 (b) 表明：当冲击波到达壳体内壁面之前，壳体没有发生变形。图 3 (c)、3 (d) 表明当冲击波在壳体内壁面反射时，由于应力波的传播速度快，壳体的各个部位都几乎瞬时开始振动，封头顶点附近的振幅大于其它部位。图 3 (e)、3 (f) 显示封头顶点附近的振动较其它部位更加突出。图 3 (g)、3 (h) 表明当冲击波到达椭球封头附近时，该处的振幅已大大超过其它部位，计算结果显示：封头外壁面四边形单元最大位移约为该单元未受扰动时径向长度的 1.8 倍，壳体圆柱壁面的最大位移约为未受扰动时单元径向长度的 20%。椭球封头与圆柱连接处的最大位移略小于 20%。这表明在封头顶点附近，而不是顶点处的变形最大。在冲击波载荷作用下，壳体将首先从封头顶点附近开始破坏。

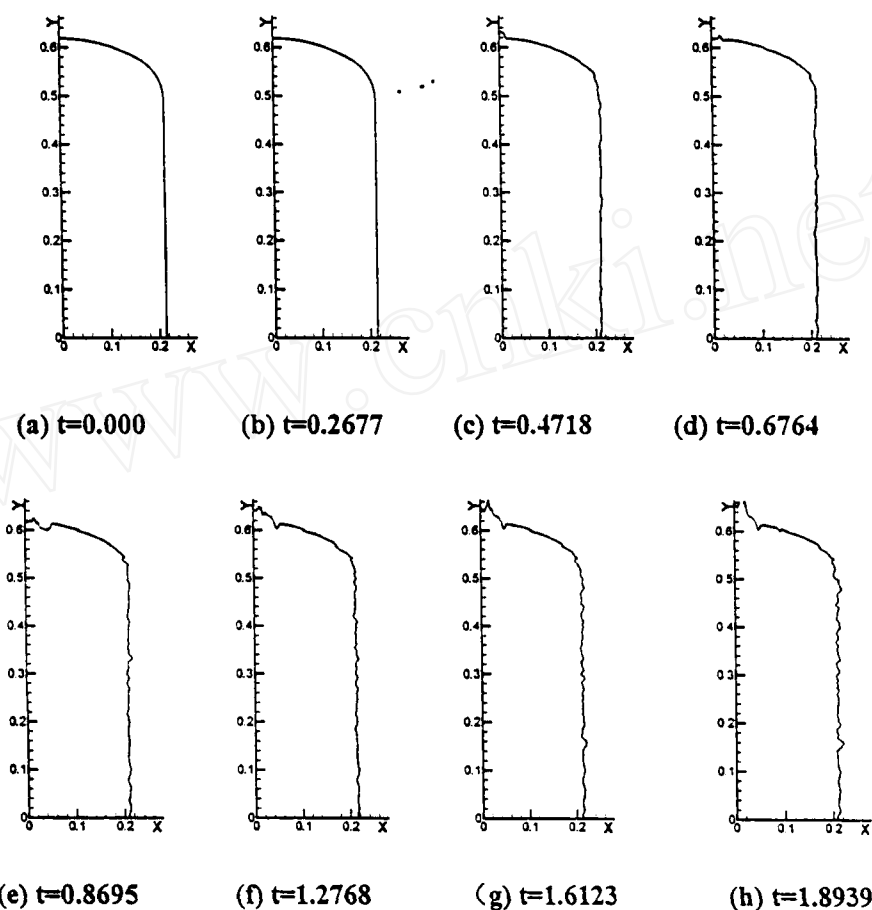


图 3 冲击波载荷作用下壳体变形的放大图 (100 倍)

计算结果还表明：冲击载荷导致爆炸容器壳体变形，并对流场产生扰动。在小药量情况下，壳体变形对流场的影响不大。因此，流场计算可忽略这种耦合效应，但研究壳体的动态响应不能简化冲击载荷的计算。

5 结 论

本文初步实现了轴对称爆炸容器内冲击波与壳体强耦合的数值计算，得到的结果定性

地反映了爆炸容器工作过程中的力学行为。应力极大值点发生在壳体近爆点环面、封头顶点附近以及圆柱侧面与封头的联接处。在中等载荷作用下,可忽略壳体变形对爆炸流场的影响。尚待解决的问题是:壳体材料在大冲击载荷作用下的力学性能,对大变形甚至破坏之后流场和壳体强耦合作用的数值模拟。

参 考 文 献

- 1 赵士达. 爆炸容器[J]. 爆炸与冲击, 1989, 9 (1): 85—96
- 2 朱文辉等. 解析方法与数值模拟相结合求解炸药在容器内部爆炸产生的壁面载荷[J]. 国防科技大学学报. 1997, 12
- 3 钟方平. 双层圆柱形爆炸容器弹塑性结构响应的实验和理论研究[D]. 中国科学技术大学博士论文, 1999
- 4 张鹏. 轴对称爆炸容器中冲击波与壁面耦合作用的数值研究[D]. 中国科学技术大学学士论文, 2000
- 5 周毓麟. 一维非定常流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 1990, 354—396
- 6 Colella P, Woodward P. The piecewise parabolic method (PPM) for gas-dynamical simulations[J]. J. Comput. Phys., 1984, 54:174-201
- 7 Key S W. HONDO—a finite element computer program for large deformation dynamic response of axisymmetric solids. 1974
- 8 黄克智, 黄永刚. 固体本构关系[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999
- 9 朱文辉. 圆柱形爆炸容器动力学强度的理论和实验研究[D], 国防科技大学博士论文, 1994