

## 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

朱文辉 薛鸿陆 张振宇

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

**摘要** 本文采用总变差递减(TVD)数值方法与强爆炸解析解相结合的手段,求解了炸药在爆炸容器内部产生的作用载荷。计算结果与实验值在几个典型位置进行了比较,二者有良好的符合。与单纯的数值方法相比,本文所探索的方法能有效地克服对称轴附近的数值振荡,不失为确定爆炸载荷的一种新途径。

**关键词** TVD方法,解析解,爆炸载荷

**分类号** V211.41

## Combining Analytical Method with Numerical Simulation to Obtain Blast Load on Chamber Wall Produced by an Explosive Charge

Zhu Wenhui Xue Honglu Zhang Zhengyu

(Department of Applied Physics,NUDT,Changsha,410073)

**Abstract** The method combining numerical simulation with analytical solution of strong explosion was employed to determine blast load on the inner wall of an explosive chamber produced by a concentrated charge with different weight. The calculated results were compared with those of experiments at several typical position on chambers and showed a good agreement. The approach can eliminate the numerical oscillation near the symmetric center of chambers and was effective to determine the blast load.

**Key words** TVD method, analytical solution, explosion load.

爆炸容器内壁面上作用载荷的确定是爆炸容器设计和动力学强度评估的基础,因而在应用上具有重要的意义。本文采取解析解和数值解相结合的途径,来获得爆炸容器内壁

面上作用载荷的分布情况,目的是为这类问题的解决在现有数值计算手段的基础上找到一条切实可行的途径。解析解即将集中装药爆炸过程的初期各动力学参量(压力,速度和密度)由点爆炸的自模拟解来描述,并以此作为初始条件进行数值模拟。数值方法使用 Harten 等人<sup>[1]</sup>于 80 年代初期基于守恒方程的弱解条件,并通过限制过程的总变差所提出的 TVD 方法。这类方法激波计算精度高,能有效限制数值离散,且无需加人工粘性,已在许多方面得到应用<sup>[2~4]</sup>。从所得的计算结果与实验结果的良好符合,揭示了所使用的方法是有效的,结果是合理的。

## 1 一维强爆炸的自模拟解

爆炸容器内部几何中心放置集中炸药爆炸,这一过程的初始阶段,即在距爆心不太远的范围内,冲击波是很强的,可以按极强冲击波来处理,受扰气体的运动是自模拟的<sup>[5]</sup>。以  $x, t$  表示空间和时间坐标,定义无量纲自变量  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{x}{(E/\rho_0)^{1/(3+N)} \cdot t^{2/(3+N)}}$$

$E$  为能量量纲的常数,它与爆源的初始能量  $E_0$  满足光源  $E = \alpha E_0$ ,  $\alpha = \alpha(r)$  是待定常数,选择  $\alpha(r)$  的值使冲击波轨迹  $\lambda = 1$ ,  $r$  为绝热指数。

令  $V, R, p$  分别表示速度  $u$ , 密度  $\rho$  和压力  $P$  的无量纲量,它们满足

$$u = \left(\frac{x}{t}\right)V(\lambda), \quad \rho = \rho_0 R(\lambda), \quad P = p_0 \left(\frac{x^2}{t^2}\right)P(\lambda)$$

其中,  $\rho_0$  和  $p_0$  是未扰大气的密度和压力。求解一维流体动力学方程组,并利用冲击波阵面上关系可以得到点爆炸情形的解:

$$\lambda(V) = \left[\frac{2}{5(r+1)}\right]^{\frac{r+1}{3r-1}} \cdot \left(\frac{V}{2}\right)^{-\frac{2}{3}} \cdot \left[\frac{r}{r-1}\left(V - \frac{2}{5r}\right)\right]^{\frac{r-1}{2r+1}} \\ \cdot \left[\frac{3r-1}{r-7}\left(V - \frac{2}{3r-1}\right)\right]^{-\frac{13r^2-7r+12}{5(3r-1)(2r+1)}}$$

无量纲密度和压力可以通过下面两个方程确定:

$$\lambda^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{P(\delta - V)}{R^{r-1}} = \delta^3 \cdot \frac{2}{r+1} \cdot \left(\frac{r-1}{r+1}\right)^r \\ \frac{P}{R} = (r-1) \cdot \frac{(\delta - V)V^2}{2(rV - \delta)}, \quad \delta = \frac{2}{5}$$

## 2 数值模拟方法(TVD)

令  $\rho, p$  表示密度和压力;  $u$  和  $m$  分别表示  $r$  方向的速度和动量,  $m = \rho u$ ;  $v$  和  $n$  表示正方向的速度和动量,  $n = \rho v$ ;  $e$  表示单位体积的总能量,  $e = \frac{p}{r-1} + \frac{m^2 + n^2}{2\rho}$ , 并定义

$$w = (\rho, m, n, e)^T, \quad f(w) = [m, p + m^2/\rho, mv, m(p + e)/\rho]^T, \\ g(w) = [n, nu, p + n^2/\rho, n(p + e)/\rho]^T, \\ h(w, r) = -\frac{u}{r}(\rho, m, n, p + e)^T$$

则二维轴对称爆炸流场的 Euler 型方程为:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial f(w)}{\partial r} + \frac{\partial g(w)}{\partial z} = h(r, w)$$

采用维数分离的 TVD 方法,上述方程可以表达为:  $L_r L_z L_z L_r W_{i,j}^n = w_{i,j}^{n+2}$ , 其中  $L_r$  和  $L_z$  分别是  $r$  方向和  $z$  方向的对应于下面方程组

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial f(w)}{\partial r} = 0 \quad \text{及} \quad \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial g(w)}{\partial z} = 0$$

的二阶精度的 TVD 差分算子。它们的具体表达式可参见有关文献[3,4]。

### 3 数值计算过程

按上述格式,沿  $r$  和  $z$  方向扫描一次之后,计算源项,得到  $w_{i,j}^{n+1}$ ; 然后先后沿  $z$  和  $r$  方向依次扫描,计算整个循环后的源项,得到  $w_{i,j}^{n+1}$ , 如此完成一个时间层计算。以后反复进行,直至指定时刻。时间步长按 Courant 条件取为

$$\Delta t = \mu \cdot \min\left(\frac{\Delta r}{m_r}, \frac{\Delta z}{m_z}\right)$$

$\mu$  为 Courant 数,  $0 < \mu < 1$ ,  $M_r = \max(|u_{i,j}| + C_{i,j})$ ,  $M_z = \max(|v_{i,j}| + C_{i,j})$ .

### 4 计算实例

使用上述格式,针对两种尺寸的爆炸容器分别在三种不同药量爆炸的实验条件下,模拟计算了相应的爆炸流场和容器内壁面的作用载荷。模拟参数见表 1。计算中,容器半径取为 213mm,炸药 RDX 的爆热取  $E_0 = 5381\text{J/g}$ ,药量分别为 9.1g, 18.2g 和 27.4g。

表 1 不同药量集中装药爆炸下流场计算的模拟参数

容 器 例	容器尺寸		药量 RDX(g)	网格数	空间步长	$\mu$	$R_{\text{shock}}$ (m)	$D_{\text{shock}}/C_0$	
	$z_0/a$	$z_{\text{max}}/a$							
I	1		9.12				$7.51E-2$	10.62	
	2	1.36	1.86	18.24	$50 \times 100$	$\Delta r = 2.0E-2$ $\Delta z = 1.86E-2$	0.5	$9.67E-2$	10.62
	3			27.36				$1.07E-1$	10.88
I	4		9.12				$7.40E-2$	10.85	
	5	2.39	2.89	18.24	$40 \times 120$	$\Delta r = 2.50E-2$ $\Delta z = 2.41E-2$	0.5	$9.67E-2$	10.62
	6			27.36				$1.01E-1$	11.69

表中,  $R_{\text{shock}}$  是初始解析解确定的区域半径,  $D_{\text{shock}}$  是解析解所确定的冲击波速度,  $C_0$  为未扰大气中的声速,  $a$  为容器半径,  $D_{\text{shock}}/C_0$  即为激波马赫数。

模拟容器为圆柱壳体与 2:1 标准椭球封头的组合结构。由于爆炸流场的对称性,可以取如图 1 所示的模拟区域。在爆炸初期,流场参数由自模拟解给定,区域的大小满足激波马赫数大于 10 的条件。在其他区域内流场满足初始未扰动条件。计算中容器壁视为刚性壁面,空气和爆炸产物视为理想气体,服从多方律,绝热指数取  $\gamma = 1.4$ 。

### 5 结果与讨论

两种尺寸的容器分别在三种不同装药量情形下的计算结果列于表 2 和表 3,在中心

位置和靠近封头连接处两个位置压力的实验值也一并列出。从表中可以看出,二者之间符合良好相对误差约 20%。

表 2 模拟得到的容器(I)的最大反射压力及与实验的比较

算例	模拟值				实验值	
	A	B	C	D	A	B
1	68	44	19	19	69±4	16±2
2	103	73	40	50	112±9	60±4
3	156	110	62	80	135±25	78±15

\*注:对算例 1,2,3,  $z_B = a/2, z_C = a, z_D = 1.86$ (极点), 压力单位: atm

表 3 模拟得到的容器(I)的最大反射压力及与实验的比较

算例	模拟值				实验值	
	A	B	C	D	A	D
4	49	25	22	10	48±4	/
5	100	56	45	15	95±7	/
6	138	77	66	22	121±10	/

\*注:对算例 4,5,6,  $z_B = 0.85a, z_C = a, z_D = 1.5a$ ; 压力单位: atm

表 2.3 中实验值取自文献[7],那里对整个实验给出了详尽的描述。

图 2 和图 3 给出了与图 1 中各标定位置的压力随时间变化的曲线。可见,在主体圆柱壳中心截面附近,波系比较简单,  $p(t)$  曲线呈现单调上升和下降的特征,且可观察到多次脉冲的出现,但后续脉冲与第一个压力脉冲相比有较小的压力峰值和相对长的作用时间。主体上各位置随着远离中心截面移向封头连接处,压力的衰减出现非单调性,且反射峰压逐渐降低,压力作用时间则依次增长。由于波之间的相互作用,封头顶点的压力特征十分复杂,并可能有多峰的存在。但是实际中没能测量封头极点的压力,因而无法比较。可以预见,由于曲边边界的引入,压力变化的过程将有赖于边界的精细处理。容器(I)主体上远离中心截面处的压力特征也与实验观察的结果很一致,峰压很小,变化过程有很复杂的图像<sup>[8]</sup>。

将这些结果用于实际结构的响应计算,得到了相当令人满意的数据,几个典型位置的应变与实验值符合良好,这从另一侧面确认了数值结果的有效性。在本文数值计算的过程中发现,对四周封闭的这类约束边界内部的动力流场的计算,若不改变其他模拟条件而仅仅在瞬时炸轰假定下从起始时刻就采用 TVD 方法进行模拟,则根本不能得到壁面作用载荷的结果。这说明在爆炸过程的初期使用解析解确能给流场的计算带来许多益处,可能

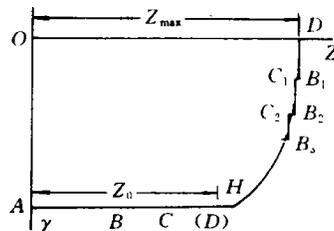


图 1 模拟区域示意图

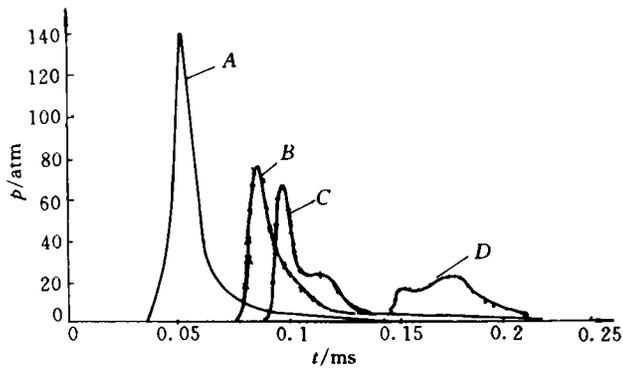


图2 容器(I)几个位置的反射压力计算值  
(装药 27.36gRDX, D 点为主体靠近法兰处位置)

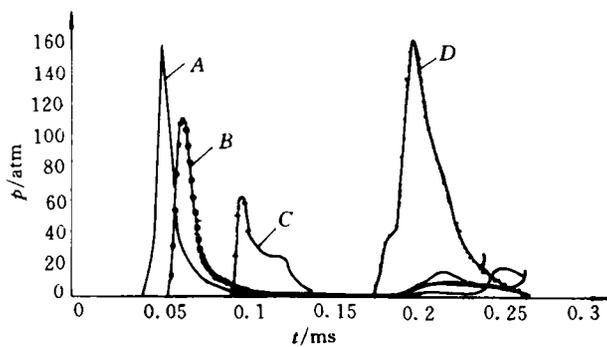


图3 容器(II)几个位置的反射压力计算值  
(装药 27.36gRDX, D 点为封头顶点)

为固定区域内部炸药爆炸的流场计算提供了一个新途径。

### 参 考 文 献

- 1 Harten A et al. J. Comput. Phbys. 1983, 49:357
- 2 郑敏, 张涵信. 空气动力学学报. 1989, 17(3):273
- 3 彭金华, 汤明钧. 爆炸与冲击, 1991, 11(4):289
- 4 张福祥, 沈从咏. 爆炸与冲击, 1992, 12(4):343
- 5 周毓麟. 一维非定常流动. 科学出版社, 1990
- 6 Roe P L. J. Comput. Phys, 1981, 43:357
- 7 朱文辉. 薛鸿陆等. 爆炸与冲击, 1995, 15(4):374
- 8 朱文辉. 圆柱形爆炸容器动力学强度的理论和实验研究:[学位论文]. 长沙:国防科技大学, 1994

(责任编辑 石少平)