

# CE / SE 方法在障碍物对爆炸冲击波干扰 流场计算中的应用

李 昕, 翁春生, 白桥栋

(南京理工大学 动力工程学院, 江苏 南京 210094)

[摘要] 应用高精度的 CE / SE 方法对厂房中爆炸冲击波扫过障碍物挡墙形成的流场进行了二维数值模拟, 具体分析了障碍物、厂房内壁与冲击波相互作用的规律, 得到了能够反映障碍物作用前后波系结构变化的压力等值线图. 数值结果显示了冲击波遇障碍物发生反射、绕流等现象, 形成复杂波系; 通过与无障碍物存在的爆炸流场对比, 分析了相对于爆点不同位置的障碍物对爆炸流场的影响; 最后改变爆点个数, 对爆炸流场的变化做了进一步分析. 数值模拟结果符合相关物理规律.

[关键词] CE / SE 方法, 爆炸冲击波, 厂房, 障碍物, 数值模拟

[中图分类号] T 011. + 1 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2007)04-0033-07

## Application of the CE / SE Method to Numerical Simulation of Obstacle Interaction With Blast

Li Xin, Weng Chunsheng, Bai Qiaodong

(School of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract** In this paper, a two-dimensional flows of blast waves in a workshop is simulated numerically by using a high precise CE / SE method. Interactional principles among blast waves, obstacles and internal walls of the workshop are analysed. A pressure contours chart is obtained that can clearly show the evolution of shock structure. Numerical results show complex wave system as blast waves reflecting or passing around the obstacles. By comparing with the explosive field without obstacles, we analyze the influence which obstacles with different distance to center of explosion point effect on explosive field. At last, more analysis about the change of the explosive field have been made by changing the number of explosion point. Numerical results accord with the relevant physical laws.

**Key words** CE / SE method, blast wave, workshop, obstacle, numerical simulation

## 0 引言

爆炸与冲击的研究具有重要的理论和实际意义. 在战争或是日常生活中, 都存在由于危险物质导致爆炸发生的可能. 由于爆炸过程持续时间短, 处于高温高压的极端条件下, 具有严重的破坏性, 加上试验测试有很大的难度, 经济耗费大, 因此数值模拟就成为十分重要的手段.

用数值方法来模拟实际爆炸场, 研究爆炸冲击波对物体的作用规律以及毁伤效应, 可获得比实验更加详尽的结果, 用以指导工程实践, 具有较强的现实意义和应用价值. 然而, 数值解的精确与否与对研究对象所作的合理简化及数值方法的选择密切相关. 在数值方法的选择上, 岳鹏涛等人利用二阶迎风 TVD 格式对多组分全 N-S 方程进行全耦合数值求解<sup>[1]</sup>; 刘君等人基于 TVD 格式的基础上提出了 NND2M 格式, 并对 NND2M 格式进行再构造, 得到一种新型的 ENO 格式, 对爆炸冲击波扫过障碍物时形成的二维和三维干扰流场进行了数值模拟<sup>[2]</sup>; 宁建国等人采用有限差分数值方法和三维多流体网格法, 开发出了解决此类问题的 MMIC3D 程序以及可视化程序 Vis3D<sup>[3]</sup>. 而 CE / SE 方法作为最近才发展起来的计算强间断的最有效的方法之一, 具有较高精度和稳定性, 能够清晰地捕捉到激波等强间断. 本文应用 CE / SE 方法计算分析大

收稿日期: 2007-04-20

基金项目: 国家自然科学基金 (10672080) 资助项目.

作者简介: 李 昕 (1982-), 女, 博士研究生, 主要从事爆炸及电动力学的学习与研究. E-mail: wxying55@126.com

通讯联系人: 翁春生 (1964-), 教授, 博士生导师, 主要从事爆炸推进技术与理论的教学与研究. E-mail: weng@mail.njust.edu.cn

型的爆炸流场,对障碍物对爆炸冲击波干扰流场进行了二维数值模拟,为拓展 CE/SE 方法的应用领域做了新的尝试.

1 控制方程

爆炸对目标的破坏和杀伤主要是通过爆炸波冲击作用实现的.爆炸场中仅涉及爆轰产物和空气两种介质.在本文中,将炸药爆轰过程简化为瞬时爆轰,即认为炸药在瞬间转化为高温高压的气体,不考虑产物气体与空气性质的差别,忽略粘性和热损耗.

控制方程组采用无粘、无热传导、忽略体力的二维非定常可压缩流体的偏微分方程组,坐标系采用二维笛卡尔直角坐标系.其用向量形式表示为<sup>[4]</sup>:

$$\frac{\partial U_m}{\partial t} + \frac{\partial F_m}{\partial x} + \frac{\partial G_m}{\partial y} = 0 \quad (m = 1 \ 2 \ 3 \ 4)$$

(1)

方程组由质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程和状态方程组成,其中,

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (\rho E + p)u \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (\rho E + p)v \end{bmatrix}.$$

对于完全气体,又有  $P = (\gamma - 1)\rho e$ ,  $E = e + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$ . 控制方程各参数均采用无量纲形式.

2 数值方法

CE/SE方法<sup>[5]</sup>与以往的计算方法有着根本性的不同,显示出一些特殊优点,如对空间通量和时间通量统一处理;引入求解元(SE)和守恒元(CE),在每一个SE中,流场变量假定为连续,但不同求解元之间的物理量可以不连续,使格式局部和全局都能严格保证其物理意义上的守恒律;其精度在时间和空间上都是二阶的,还可根据需要进行提高;对激波等强间断具有很高的分辨率,计算激波时无需应用黎曼分解.

二维CE/SE方法是将整个空间-时间的计算域划分为若干个求解元.物理量在每个求解元内是连续的,并可用泰勒级数展开,穿过相邻求解元的边界,流场变量可以是不连续的.在每个守恒元上,时空通量是守恒的.整个计算域划分为交替网格,每个单元的中心点用圆点表示,如图1中的Q点<sup>[6]</sup>.

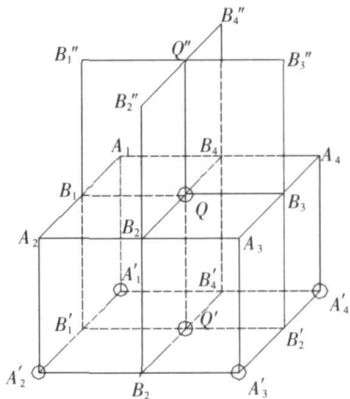


图 1 CE/SE 方法中的守恒元和求解元  
Fig.1 The definition of CEs and SEs

令  $\Omega$  表示三维欧几里德空间  $E_3$  上所有网格点  $Q(i \ j \ n)$ .  $QA_1A_2A_3A_4$  表示  $t$  时刻,  $Q'A'_1A'_2A'_3A'_4$  表示  $t^{n-\frac{1}{2}}$  时刻,  $Q''A''_1A''_2A''_3A''_4$  表示  $t^{n+\frac{1}{2}}$  时刻. 那么  $SE(Q)$  定义为平面  $Q'Q''B''_1B'_1, Q'Q''B''_2B'_2, Q'Q''B''_3B'_3, Q'Q''B''_4B'_4$  以及平面  $A_1B_1A_2B_2A_3B_3A_4B_4$ .  $CE(Q)$  定义为柱体  $A_1B_1A_2B_2A_3B_3A_4B_4A'_1B'_1A'_2B'_2A'_3B'_3A'_4B'_4$ . 从图1看出,  $CE(Q)$  可分为下列几部分并分别在其相应的求解元中: (1)  $A_1B_1A_2B_2A_3B_3A_4B_4$  在  $SE(Q)$  的  $A_1B_1A_2B_2A_3B_3A_4B_4$  中; (2)  $A'_1B'_1Q'B'_4, A'_1B'_4B_4A_1$  与  $A'_1B'_1B_1A_1$  在  $SE(A'_1)$  中; (3)  $A'_2B'_2Q'B'_1, A'_2B'_1B_1A_2$  与  $A'_2B'_2B_2A_2$  在  $SE(A'_2)$  中; (4)  $A'_3B'_3Q'B'_2, A'_3B'_2B_2A_3$  与  $A'_3B'_3B_3A_3$  在  $SE(A'_3)$  中; (5)  $A'_4B'_4Q'B'_3, A'_4B'_3B_3A_4$  与  $A'_4B'_4B_4A_4$  在  $SE(A'_4)$  中.

根据 Chang 的时空一致处理方法<sup>[5]</sup>, 令  $x_1 = x, x_2 = y, x_3 = t$  作为  $E_3$  上的三个坐标. 利用高斯定理有下面的积分公式:

$$\oint_{S(v)} h \cdot ds = 0,$$

(2)

式中,  $S(v)$  是  $Q$  在  $E_3$  中任意的时空边界,  $h$  是时空通量密度矢量. 对于任意的  $(x, y, t) \in SE(i \ j \ n)$ ,  $U(x, y, t), F(x, y, t)$  与  $G(x, y, t)$  可用其相应的离散量  $U^*(x, y, t; i \ j \ n), F^*(x, y, t; i \ j \ n)$  与  $G^*(x, y,$

$t_i, j, n$ ) 近似代替, 利用泰勒级数展开为:

$$U^*(x, y, t_i, j, n) = (U)_{i,j}^n + (U_x)_{i,j}^n(x - x_i) + (U_y)_{i,j}^n(y - y_j) + (U_t)_{i,j}^n(t - t_i^n), \quad (3)$$

$$F^*(x, y, t_i, j, n) = (F)_{i,j}^n + (F_x)_{i,j}^n(x - x_i) + (F_y)_{i,j}^n(y - y_j) + (F_t)_{i,j}^n(t - t_i^n), \quad (4)$$

$$G^*(x, y, t_i, j, n) = (G)_{i,j}^n + (G_x)_{i,j}^n(x - x_i) + (G_y)_{i,j}^n(y - y_j) + (G_t)_{i,j}^n(t - t_i^n). \quad (5)$$

相应地,

$$h^*(x, y, t_i, j, n) = (U^*(x, y, t_i, j, n), F^*(x, y, t_i, j, n), G^*(x, y, t_i, j, n)). \quad (6)$$

根据守恒元定义, 式(2)在守恒元  $SE(Q)$  上用离散量表示为:

$$\oint_{\partial CE(Q)} h^* \cdot ds = 0 \quad (7)$$

计算穿过  $CE(Q)$  各个边界的  $h^*$  的积分通量可得<sup>[6]</sup>:

$$U_{i,j}^* = \frac{1}{4} \left[ \left( U + \frac{\Delta x}{4} U_x \right) - \frac{\Delta t}{4} \left( G_y - \frac{8}{\Delta x} F - F_x - \frac{2\Delta t}{\Delta x} F_t \right) \right]_{i-\frac{1}{2},j}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{1}{4} \left[ \left( U - \frac{\Delta x}{4} U_x \right) - \frac{\Delta t}{4} \left( G_y + \frac{8}{\Delta x} F - F_x + \frac{2\Delta t}{\Delta x} F_t \right) \right]_{i+\frac{1}{2},j}^{n-\frac{1}{2}} + \\ \frac{1}{4} \left[ \left( U + \frac{\Delta y}{4} U_y \right) - \frac{\Delta t}{4} \left( F_x - \frac{8}{\Delta y} G - G_y - \frac{2\Delta t}{\Delta y} G_t \right) \right]_{i,j-\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{1}{4} \left[ \left( U - \frac{\Delta y}{4} U_y \right) - \frac{\Delta t}{4} \left( F_x + \frac{8}{\Delta y} G - G_y + \frac{2\Delta t}{\Delta y} G_t \right) \right]_{i,j+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$U_x, U_y, F_x, F_y, G_x, G_y$  等项的具体算法可参见文献[6].

### 3 物理模型

算例所采用的物理模型为一间具有爆炸隐患的厂房, 内部由挡墙分割成多个隔间, 每个隔间在中部开有门, 门均看作开启, 使隔间互相贯通. 爆点设置在厂房中轴线上, 因此流场平面对称, 只需计算一半区域即可. 计算区域(长度×宽度)为  $50\text{m} \times 15\text{m}$ . 障碍物挡墙尺寸为(宽度×厚度)  $12\text{m} \times 1\text{m}$ , 个数设置为 3 个, 与厂房侧壁面垂直, 将厂房分割为 4 个隔间. 设无量纲仓库长为 1, 所有物理量都是无量纲的. 计算域内计算网格数为  $500 \times 100$  1 个爆点, 爆点中心坐标  $(400, 0)$ , 具体如图 2 所示.

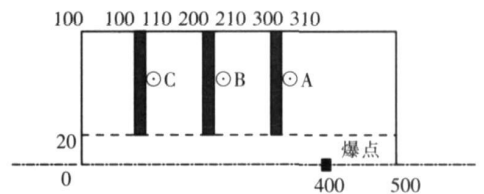


图 2 计算区域示意图

Fig.2 The schematic diagram of computational domain

### 4 计算结果及分析

#### 4.1 定解条件

边界条件: 厂房内壁及障碍物边缘处理为固壁边界条件, 根据镜面反射法确定.

初始条件: 将爆炸源的爆轰看作瞬态爆轰, 爆源起爆后瞬间产生高温、高压的气体, 并释放能量, 高温高压的气体向外膨胀. 初始时刻压力值一般用下式确定<sup>[2]</sup>:

$$p = 510.4 \left[ 1 + 57.37 \left( \frac{r}{\sqrt{w}} \right)^{\frac{10}{9}} \right].$$

式中,  $r$  为爆炸冲击波到爆心的半径  $\text{m}$ ;  $w$  为装药量  $\text{kg}$ . 波阵面上其它参数用  $R-H$  关系式给出. 一般取较小半径则认为爆炸源内物理参数不变. 在数值计算时输入了原始条件做为爆炸场的初始条件, 冲击波初始半径  $r = 1\text{m}$ , 波阵面上:  $(\rho, u, p) = (7.0, 0, 15.0)$ . 障碍物所在区域设压力  $P = 0$ , 温度  $T = 0$ , 其余位置速度均为零, 压力为常压, 温度为室温,  $P = 1, T = 1$ ; 密度由状态方程确定.

#### 4.2 计算结果及分析

##### 4.2.1 有障碍物爆炸流场单个爆点情况下的数值计算

本文将单个爆点情况下有障碍物存在的爆炸场作为分析比较的基准, 重点分析障碍物挡墙对爆炸冲击波压力场的影响. 不同时刻的压力等值线如图 3 所示.

图 3(a) 显示了爆炸初始爆点附近区域气体的压力急剧上升, 形成强间断, 在等值线图上表现为密集的等压线, 即存在很大的压力梯度, 随后爆炸冲击波将以球面波的形式向四周膨胀扩张, 形成膨胀波.  $t =$

0.011 时刻,爆点附近中心区域压力已大大衰减.起始段持续的时间非常短,影响区域也很小.

图 3(b)显示了  $t=0.078$  时刻,爆炸冲击波右侧与第一个障碍物挡墙前壁、侧壁相遇的瞬间.起爆后,爆炸冲击波沿轴向径向传播,波阵面光滑规则,未受任何障碍的扰动,爆源周围形成空腔.正压区随着冲击波的传播不断拉宽.爆炸冲击波峰值已处于波阵面上,强度不断衰减.在  $t=0.078$  时刻,爆炸冲击波与障碍物相遇处波阵面的气流质点被遏制,下一层的运动质点亦被阻止,停止向入射波传播方向的运动,附近短时间内会出现高压静止区.随后冲击波与障碍物发生反射,质点从障碍物返回,使得迎波面局部压力增强,产生激波.在图 3(b)中可以看出与障碍物接触区域压力达到计算区域内的最大值.

图 3(c)显示了在  $t=0.181$  时刻,爆炸冲击波大范围接触障碍物前壁与厂房壁面,发生反射,产生 3 道相对于运动方向反向的弓形激波,激波后是一系列的膨胀波;未与障碍物接触的冲击波运动并未遇到障碍,可以不受阻碍继续传播,波阵面压力随着传播距离的增大逐渐降低.相对于障碍物前壁、侧壁迎波面附近的高压区,它就成为低压区.一方面入射冲击波沿着挡墙侧壁向前传播,另一方面挡墙前壁迎波面附近的空气由高压区向侧壁边缘处低压区流动,在障碍物侧壁形成绕流,与直接传播过来的冲击波汇集在一起,传播至下一个隔间.爆炸冲击波强度比前一阶段整体有所下降,影响区域扩大.

图 3(d)显示了  $t=0.277$  时刻,爆炸冲击波已波及到第二个障碍物挡墙,发生反射和绕流.冲击波在相邻两个障碍物间震荡叠加,多次出现激波、压力峰,并逐渐衰减.第二个障碍物侧壁处有明显的绕流现象;上一阶段产生的弓形激波再次相遇,反射叠加产生新的激波.

图 3(e)显示了  $t=0.473$  时刻后,爆炸冲击波已传播到最后一个隔间.压力前场由于波的反射叠加,不断有新的激波、膨胀波、绕流乃至涡的出现,波系复杂;远场压力已大大衰减,整体逐渐趋于平缓,对最后一个隔间的影响已经不太明显.

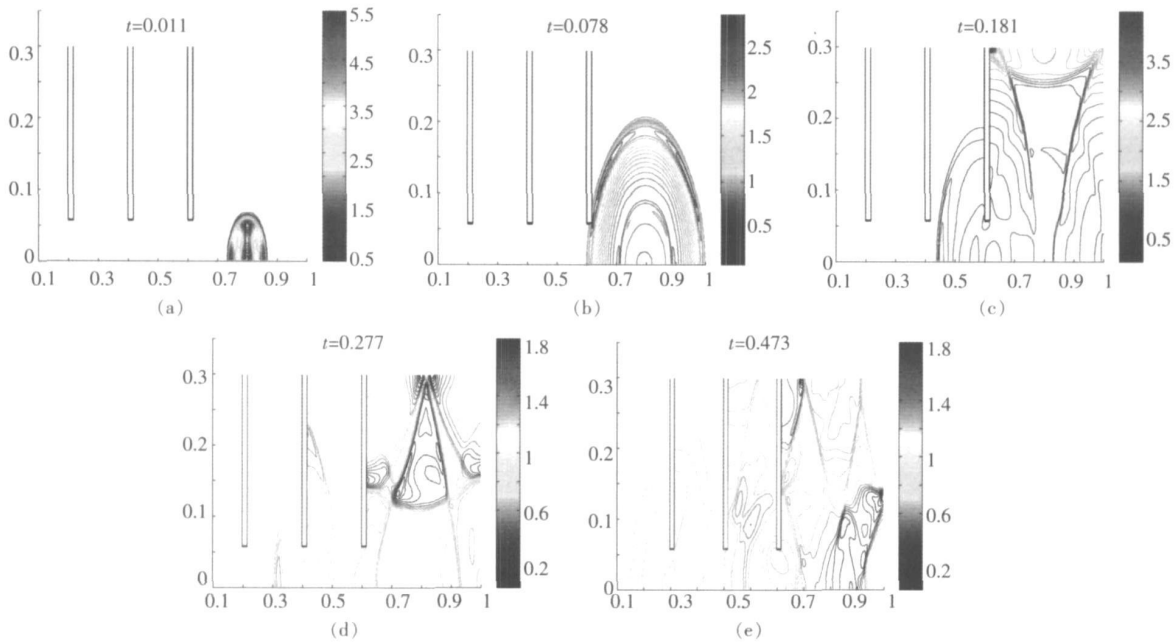


图 3 不同时刻压力等值线图(有障碍物,1 个爆点)  
Fig.3 Pressure contours as function of time(with obstacles,one explosion point)

#### 4.2.2 无障碍物情况下爆炸流场的比较

为了说明障碍物对爆炸冲击波的干扰作用,本文对无障碍物存在时的爆炸场进行了数值计算,用以对比分析.不同时刻的压力等值线图如图 4 所示.

从图 3 图 4 的比较中发现,在相近的时刻,无障碍物存在的爆炸冲击波压力场比有障碍存在时要简单的多.爆炸初始,爆点附近区域形成强间断,表现为密集的等压线,即存在很大的压力梯度,如图 4(a)所示.随后冲击波始终以球面波的形式向四周膨胀扩张,形成膨胀波,压力峰时刻处于波阵面上,影响区域不断扩大,强度也逐渐衰减.爆源周围形成空腔,波阵面光滑规则,未受任何障碍的扰动,如图 4(b)所示.直至冲击波不断向四周推进,扩展到厂房壁面,在壁面上弹回,形成反射波.随后爆炸冲击波不断反射,反射

波与后继冲击波互相叠加,多次形成二次激波,产生压力峰,如图 4(c)、(d)所示.可以发现,无障碍物存在的爆炸流场的边界形状简单且较有规律,波系中仅存在波的反射与叠加现象,不存在绕流,激波波阵面平滑规则.

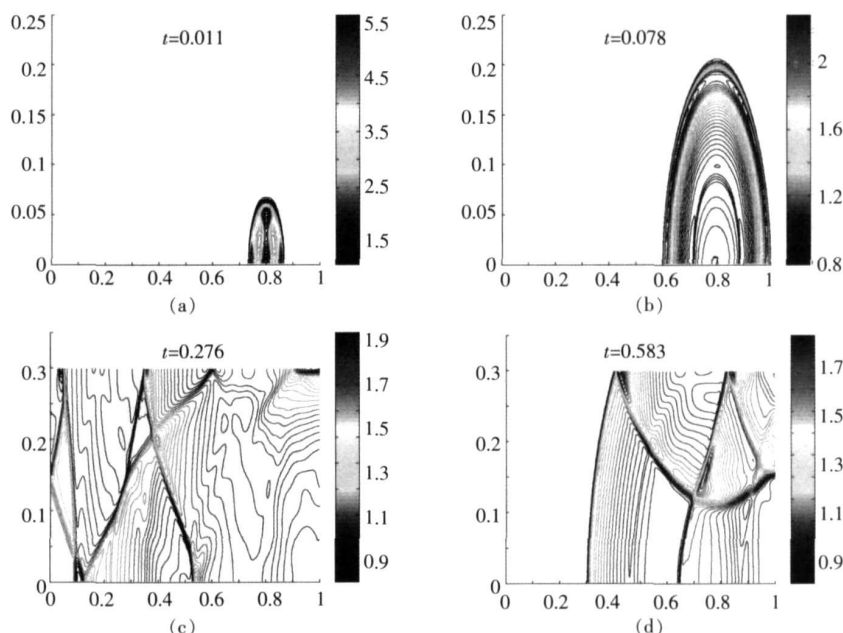


图 4 不同时刻压力等值线图(无障碍物,1个爆点)

Fig.4 Pressure contours as function of time(no obstacle, one explosion point)

为进一步观察障碍物对爆炸冲击波的影响,在 3 个障碍物迎波面的中部贴近对称轴处分别设置 A(315 60)、B(215 60)、C(115 60) 3 个观测点,观测点处压力随时间变化如图 5 所示.可以看到,不论厂房中有无障碍物,相同观测点处压力随时间曲线的变化规律大致相同,但有障碍物存在时压力峰值出现的时间整体有所延后.

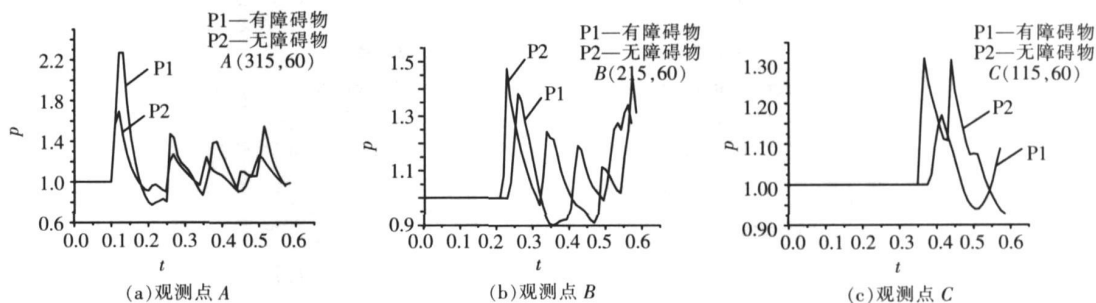


图 5 观测点处压力时间曲线

Fig.5 Pressure at view point as function of time

图 5(a)显示了 A 点处,有障碍物时的压力峰值远远大于没有障碍物的情况,可见在把障碍物作为固壁处理时,由于固壁边界的反射作用,可能导致爆炸冲击波不仅没有减弱,反而增强.其增压效果以及反射作用,可能致使多次更有伤害性冲击波峰值的产生.

图 5(b)、(c)显示了 B、C 点处,压力峰值已经比没有障碍物时有所降低,说明由于第一个障碍物挡墙对爆炸冲击波的阻挡与削弱,对压力远场起到了保护作用.

在障碍物的情况下比较 A、B、C 3 点.对于 A 点,由于壁面对爆炸冲击波的反射,在  $t = 0.12$  时刻形成第一个压力峰,随后强度逐渐减弱.由于冲击波在壁面和障碍物之间的反射叠加,在  $t = 0.26$  时刻, A 点处再次出现压力峰值,比前一时刻压力峰值有所降低,随后逐渐削弱又增强,直至出现下一个压力峰如图 5(a)中 P1 所示;对于 B 点,出现第一个压力峰值的时间  $t = 0.26$ ,冲击波在相邻障碍物间不断振荡反射,在  $t = 0.42$  时刻出现第二个压力峰,时间相对于 A 点延后,强度也相对减弱,如图 5(b)中 P1 所示;对于 C 点,

在  $t = 0.41$  时刻出现第一个压力峰, 时间最晚, 强度已大大降低, 继而逐渐削弱, 再未出现有威胁的压力峰值, 如图 5( c) 中 P1 所示. 因此, 在利用复杂边界作减压设施时, 要注意障碍物对爆炸冲击波的增强作用; 同时, 还可以看出, 由于障碍物位置不同, 距爆心距离近的障碍物可对后面的障碍物起到减压作用, 也可以推迟远场冲击波压力峰产生的时间.

4. 2. 3 两个爆点与单个爆点情况下爆炸流场的比较

影响爆炸流场的因素很多, 爆点位置、个数以及障碍物与爆源距离发生变化, 流场的边界形状也会发生变化, 爆炸冲击波强度、绕过障碍物个数也会不同, 继而对流场内物体产生不同的毁伤效应, 因此本文又对具有多个起爆点的情况作了分析. 假定起爆点为 2 个, 爆点中心坐标分别为 ( 200, 0), ( 400, 0), 起爆条件完全相同. 图 6 中可以清晰地观察到 2 个爆点同时起爆后, 爆炸冲击波传播以及遇障碍物挡墙、厂房壁面后压力场变化的情况.

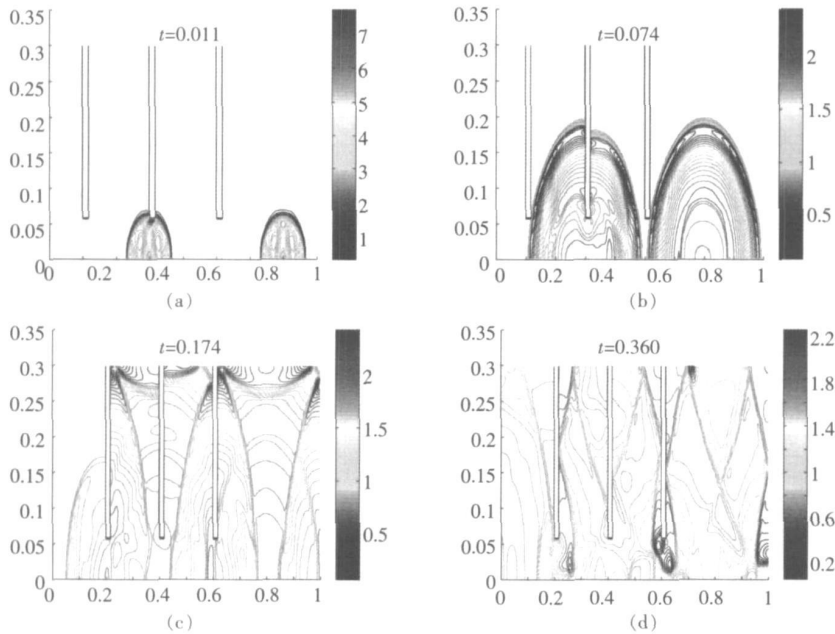


图 6 不同时刻压力等值线图 (有障碍物, 2 个爆点)  
Fig.6 Pressure contours as function of time(with obstacles,two explosion point)

图 6( a) 显示了爆炸初始, 2 个爆点附近区域气体的压力急剧上升, 形成强间断, 两个爆炸区域互未干扰, 爆炸冲击波波系基本相同, 随后冲击波峰值处于波阵面上, 以球面波的形式向四周扩张.  $t = 0.011$  时刻, 左侧冲击波已与第二个挡墙侧壁相遇, 发生反射形成激波.

图 6( b) 显示了  $t = 0.074$  时刻, 波阵面上峰值随时间推移强度衰减. 右侧爆炸冲击波即将接触挡墙, 尚未受任何扰动, 波阵面光滑规则, 正压区随着冲击波的传播不断拉宽. 左侧冲击波迎面遇到挡墙侧壁, 中部产生一系列压缩波, 与右侧冲击波中部形成的空腔有所区别. 未与障碍物接触的爆炸冲击波继续传播. 两个爆点处的冲击波尚未相互作用.

图 6( c)、( d) 显示了爆炸冲击波大范围波及到障碍物与厂房壁面, 发生反射并在相邻两个障碍物间不断震荡; 同时两个爆点处的冲击波相遇, 发生互相作用, 反射叠加, 产生了多道与入射方向反向的弓形激波, 波系更加复杂, 激波阵面后是一系列等压线稀疏的膨胀波. 同时障碍物前壁迎波面附近的空气由高压区向侧壁边缘处低压区流动, 在障碍物侧壁形成绕流, 与后部直接传播过来的冲击波汇集在一起, 传播至下一个隔间. 在  $t = 0.360$  时刻, 爆炸冲击波的影响区域已经扩大到全部计算区域, 产生多处激波.

爆点个数改变, A、B、C 3 点处压力随时间变化的趋势也发生变化. 图 7( a) 显示了 A 点处, 爆点增加前后压力变化趋势基本相同, 在时间轴的前半段, 2 个爆点条件下的压力峰值略高; 图 7( b) 显示了 B 点处两个爆点条件下出现第一个压力峰的时刻为  $t = 0.08$  比一个爆点情况下出现第一个压力峰的时刻  $t = 0.26$  大大提前. 同时压力峰值强度远大于一个爆点的情况. 图 7( c) 显示了 C 点处, 一个爆点时, 压力曲线比较平缓; 2 个爆点条件下曲线波动起伏较大, 多次出现压力峰. 在  $t = 0.13$  时刻出现的第一个压力峰则可能造

成很大伤害.

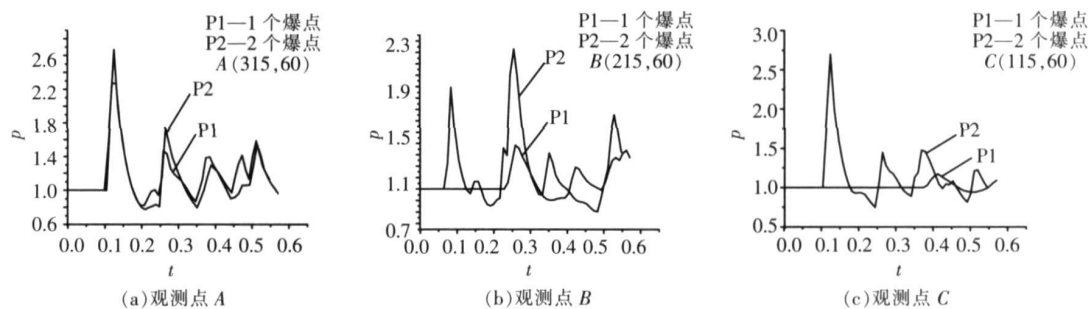


图7 观测点处压力时间曲线

Fig.7 Pressure at view points as function of time

从图7中可以看出, 2个爆点的条件下, 各观测点处产生的压力峰值比一个爆点时要高, 且压力值波动的幅度大, 由于增加的爆点靠近第二个挡墙, 对B、C两点处压力变化影响较大, 曲线形状变化比A点处明显. 这些充分说明了爆点数增加, 压力场强度增大, 流场变化更加剧烈复杂; 同时增加爆点的位置不同, 对流场中不同区域的影响也会发生变化.

## 5 结论

本文采用时间和空间二阶精度、高分辨率的CE/SE差分格式, 对厂房内爆炸场进行了二维数值模拟, 具体讨论、分析了爆炸冲击波受到障碍物挡墙干扰后的流场, 可以得出以下结论:

有障碍物存在的爆炸场比无障碍物时复杂得多, 波系中可以看出爆炸冲击波遇障碍物的反射、绕流等复杂的现象. 障碍物挡墙的增压效果和反射作用, 可能多次产生冲击波峰值, 并导致二次峰值高于前次峰值的结果, 造成很大伤害.

对于距爆心不同位置的障碍物挡墙, 其压力峰值不同. 一般来讲, 距爆心越近的障碍物, 附近区域产生的冲击波峰值越大, 时间越早, 因此受到的危害就越大. 同时, 可以推迟远场物体受到冲击的时间, 并大大降低爆炸冲击波强度, 起到对远场的防护作用.

爆点个数改变可以产生不同的流场. 爆点越多, 冲击波的强度越大, 冲击波波及到的区域范围越大, 时间也大大缩短, 并多次产生更具伤害性的冲击波峰值.

数值计算结果很好地刻画了爆炸场的细节, 符合相关物理规律, 具有良好的精度和分辨力, 能够较有效地捕获激波, 在数值计算爆炸冲击波时具有较大的优点, 对研究爆炸的毁伤效应和爆炸灾害的防控具有参考价值.

## [参考文献] (References)

- [1] 岳鹏涛, 徐胜利, 彭金华. FAE爆炸波对地面目标作用的三维数值研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(2): 97-102  
Yue Pengtao Xu Shengli Peng Jinhua 3D numerical simulations on the interaction between FAE blast waves and ground target [J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(2): 97-102 (in Chinese)
- [2] 刘君, 刘瑞朝, 贾忠湖, 等. 爆炸波与物体干扰流场的数值模拟[J]. 空气动力学报, 2000, 18(1): 55-61.  
Liu Jun Liu Ruichao Jia Zhonghu et al Numerical simulation of blast interaction with buildings[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2000, 18(1): 55-61 (in Chinese)
- [3] 吴开腾, 宁建国. 机库内爆炸流场的三维数值模拟分析[J]. 太原理工大学学报, 2005, 36(6): 725-728  
Wu Kaiteng Ning Jianguo 3D numerical simulation analysis on explosive field in plane garage[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2005, 36(6): 725-728 (in Chinese)
- [4] Weng Chunsheng Gore J.P. A numerical study of two- and three-dimensional detonation dynamics of pulse detonation engine by the CE/SE method[J]. Mechanics Sinica, 2005, 21(1): 32-39.
- [5] Chang S.C. The method of space-time conservation element and solution element: a new approach for solving the Navier-Stokes and Euler equations[J]. Journal of Computational Physics, 1995, 119(2): 295-324.
- [6] 翁春生, 王浩. 计算内弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 276-285.  
Weng Chunsheng Wang Hao Computational Interior Ballistics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 276-285 (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]