

高能量密度爆炸与化学爆炸的物理特征 及爆炸次生洪水波效应探讨

周丰峻

(洛阳水利工程技术研究所, 河南 洛阳 471023)

[摘要] 文章根据高能量密度爆炸的辐射流体动力学计算与 TNT 装药爆炸计算的结果, 对二类爆炸波系的形成发展, 爆炸近区、远区的物理特征和爆炸作用物理模拟问题进行了研究, 得出对防护工程比较重要的几点结论。同时对于同两类爆炸引起的次生洪水波灾害进行了探讨, 阐明了系统开展洪水波防护研究的重要意义。

[关键词] 高能量密度爆炸; 化学爆炸; 冲击波; 洪水波

1 序言

高能量密度爆炸, 由于爆炸的温度高达数千万度以上, 光辐射能量输运在爆炸近区的物理过程中占有主导地位, 空气与弹体物质在高温汽化之后的光学特性直接影响能量的辐射输运过程。物质的高温光学特性用不透明度表征, 就像物质的力学特性用状态方程表征一样。由于物质的辐射迁移运动和流体动力学运动是耦合的, 使高能量密度爆炸表现了波系的多样性: 有光辐射引起的辐射波和冲击启动激波, 有流体动力学运动主导引起的等温冲击波和强冲击波。

TNT 装药爆炸的反应温度要低的多, 仅为 3 000 K, 化学反应完成后的爆轰气体产物与空气之间存在一个温度相差 10 倍以上、密度相差 1 000 倍以上的接触间断面。接触间断面的存在对爆炸流体动力学运动有非常重要的影响, 它使 TNT 化学爆炸的物理特征表现了波系的多变性: 在近区有空气中的主激波和接触间断引起的爆轰产物中的次激波, 向爆心运动的二次激波之前的爆轰产物压力要远远大于主激波压力; 在远区也有空气中的主激波和次激波, 次激波有连续多个, 并且出现在超负压区中。

江河上游大面积连降暴雨或者人为进行高能量密度爆炸、大吨位化学爆炸都可能导致水利枢纽的破坏。水利枢纽主体大坝破坏后, 立即产生具有数米至数十米高涌浪激波向下游传播。洪水波的涌浪激波破坏力巨大, 对于城乡居民安全与经济目标造成严重灾害。为了消除洪水波对人民生命财产威胁, 洪水波灾害防护研究势在必行。

2 辐射流体动力学计算

采用辐射流体动力学运动方程计算了高能量密度爆炸问题^[1,2]。计算中考虑了放能金属、弹壳和空气。爆炸在自由大气标准状态下进行, 并按给定能量释放率释放能量。在爆炸火球内部采用扩散近似描述辐射迁移过程, 在火球边缘采用发射近似。有量纲辐射流体动力学方程组为

$$\begin{aligned} V &= R^2 \frac{\partial R}{\partial m} \\ \frac{\partial u}{\partial t} + R^2 \frac{\partial (P + Q)}{\partial m} &= 0 \\ \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial L}{\partial m} + (P + Q) \frac{\partial V}{\partial t} &= -D \\ \frac{\partial R}{\partial t} &= u \end{aligned} \quad (1)$$
$$P = P(T, V) + \frac{1}{3} a T^4$$

$$E = E(T, V) + aT^4 V$$

$$L = - \frac{R^4}{K} \frac{\partial T^4}{\partial m}$$

$$K = K(T, V)$$

$$Q = \begin{cases} - \frac{(c_1 \Delta m)^2}{VR^4} \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right| \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{c_2 \Delta m}{VR^2} |u| \frac{\partial V}{\partial t} & \text{当 } \frac{\partial V}{\partial t} < 0 \\ 0 & \text{当 } \frac{\partial V}{\partial t} \geq 0 \end{cases}$$

$$D = \sigma R^2 T^4 \frac{\Delta R}{I_p \cdot \Delta m} \cdot f$$

式中： m 为质量坐标， t 为时间， R 为欧拉半径， V 为比容， P 为压力， u 为质点速度。 Q 为粘性压力， E 为内能， L 为发光度， D 为辐射损失， T 为绝对温度， K 为辐射吸收系数， f 为紫外截断因子， l_p 为 Planck 平均自由程。 σ 为 Boltzmann 常数， c_1, c_2 为人工粘性计算常数。

采用差分方法对上述流体动力学方程进行计算。计算得到的多样的辐射波和激波波系见图 1~3。

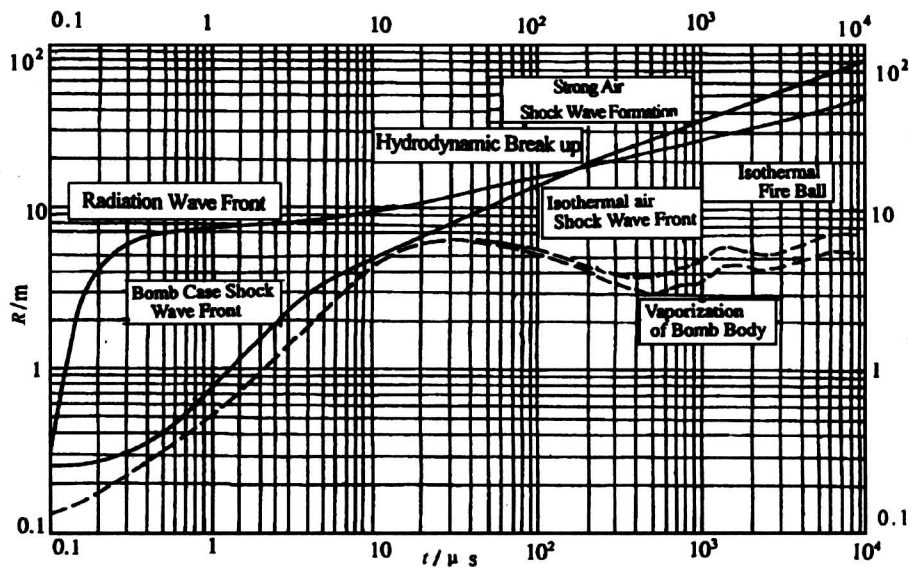


图 1 辐射波发展和强激波的形成

Fig. 1 Radiation wave development and formation of strong shock wave

下面分析其形成机制和物理特征：

1) 辐射波 在爆炸初时瞬间，释放能量使弹体汽化，随即以软 X 射线形式向外辐射能量，由于辐射作用使周围空气温度骤然升高，从而形成了辐射波。由于光辐射能量传输是以光子撞击原子核产生能级跃迁再释放出新的光子的反复过程实现的，辐射波速度是一个远低于光速的有限值。在辐射波以内形成了极高温度的等温球和极高压力的不等压球，而空气的密度为初始大气密度，质点速度为零。

2) 冲击启动激波 辐射波阵面附近的空气，在火球逆向梯度分布压力的驱动之下，开始发生运动，于是在辐射波阵面中的空气不断压密，从而在

辐射波阵面上形成了冲击启动激波。冲击启动激波的强度，随辐射波的运动而同步增长。

3) 等温冲击波 在辐射波阵面之后，弹体蒸汽在流体动力学作用下发生径向运动。开始其运动速度低于辐射波的速度，由于流体动力学运动是在等温火球中运动，速度不断增高，产生了向辐射波的追赶运动。弹壳冲击波也称为等温冲击波。

4) 强冲击波 等温冲击波追上辐射波阵面，就和冲击启动激波汇合一起，形成强冲击波。此后流体动力学运动开始脱离火球，强冲击波以绝热冲击波形式扩张运动。流体动力学脱离点的温度是 30×10^4 K，相应最大绝热冲击波的压力是 1 200 MPa。

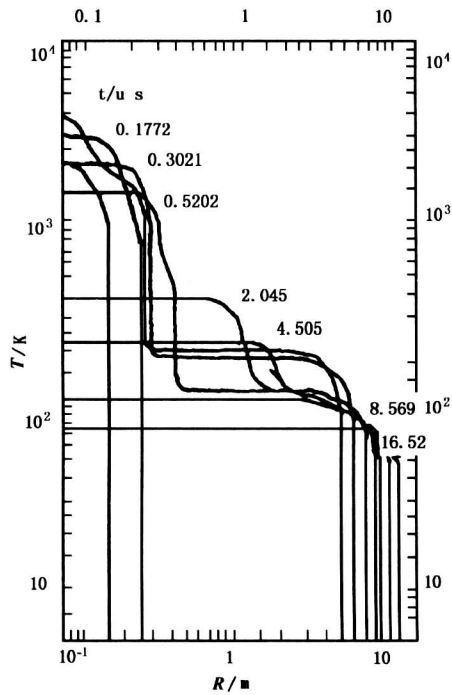


图 2 温度分布与时间关系

Fig.2 Temperature distribution versus time

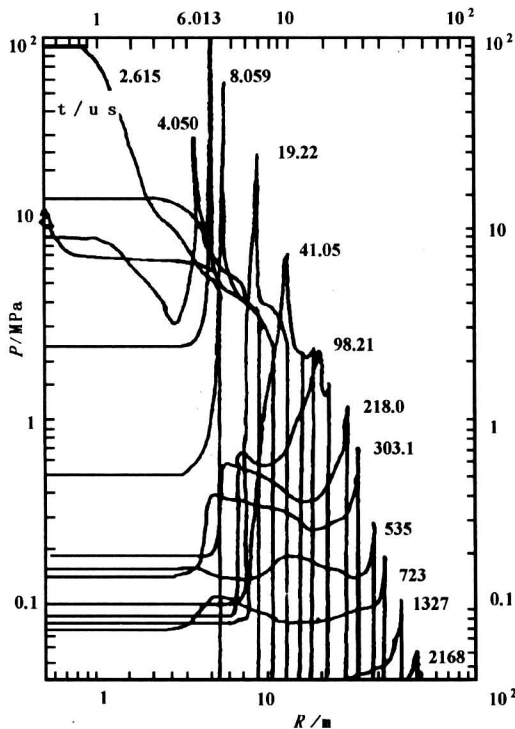


图 3 压力分布与时间关系

Fig.3 Pressure distribution versus time

3 真实空气中点源爆炸冲击波计算

辐射流体动力学计算能够较细致的刻画高能量密度爆炸的近区物理过程，但计算较为繁杂，小压力区计算精度不够。理想气体点源计算模型简单，却能较好的反映远区冲击波传播物理过程的主要特征，对于爆炸冲击波阵面超压衰减至约 10 个大气压以后的远区发展，它可以很好的描述^[3]。但对高能量密度的爆炸中区，波阵面超压在几十个大气压以上的冲击波发展过程，计算偏差较大。这主要是由于理想气体点源计算中，没有考虑空气在高温下物理力学性质的变化以及高温辐射运输的影响所造成的。

空气中含有氮、氧、氩等多种成份气体，随着温度升高，分子离解；温度再高，原子电离。温度不同，组成空气的各种分子离解程度不同，各种原子的电离程度不同，直接影响了爆炸波传播过程^[4,5]。

真实空气中点源爆炸冲击波计算，适合于高能量密度爆炸绝热冲击波形成之后的中远区爆炸波发展描述。流体动力学方程取用拉格朗日距离坐标，以提高波阵面附近的局部精度。计算方法为激波装配法，采用二阶隐式差分格式。

建立的无量纲化流体动力学方程组为^[6]（有量纲方程组略）：

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} &= \frac{\xi^2}{\sigma^2} \frac{\partial \xi}{\partial \sigma} \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{\xi^2}{\sigma^2} \cdot \frac{\partial P}{\partial \sigma} &= 0 \\ \frac{\partial P}{\partial \tau} + \frac{\xi^2 \rho^2 c^2}{\sigma^2} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \frac{2\rho u c^2}{\xi} &= 0 \quad (2) \\ \frac{\partial \xi}{\partial \tau} - u &= 0 \\ \epsilon &= \epsilon(P, \rho) \\ T &= T(P, \rho) \\ c^2 &= \frac{P/\rho^2 - \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial \rho}\right)_P}{\left(\frac{\partial \epsilon}{\partial P}\right)_\rho} \end{aligned}$$

P 为压力， ρ 为密度， ξ 为欧拉坐标， u 为质点速度， c 为声速， ϵ 为内能， T 为温度， σ 为拉格朗日距离坐标， τ 为时间

初始条件取强爆炸自模拟解，绝热指数 $\gamma = 1.3$ 。强爆解扰动区能量应与用真实空气状态方程进行差分计算的初始扰动区能量相等。为此，对初

始时刻进行了选择，本计算取初始波阵面超压为 5 077.766 8。整个差分计算进行到波阵面超压 0.01。

计算结果以无量纲表示给出的波阵面冲击波参数分布，并给出了典型爆炸条件下有量纲计算结果。

按扰动区质量守恒能量守恒检验计算精度很好，并与实测符合。

4 TNT 爆炸波计算及其对高能量密度爆炸的模拟

4.1 TNT 球形装药爆炸波计算

无量纲化流体动力学方程，引入真实空气和炸药状态方程以及相应的声速之后，其形式为^[7]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi}{\partial \tau} + \gamma_0 \lambda^2 \eta^2 c^2 \frac{\partial \beta}{\partial x} + \frac{2\gamma_0 \beta \eta c^2}{\lambda} &= 0 \\ \frac{\partial \beta}{\partial \tau} + \frac{\lambda^2}{\gamma_0} \frac{\partial \pi}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial \lambda}{\partial \tau} - \beta &= 0 \\ V = \frac{1}{\eta} = \lambda^2 \frac{\partial \lambda}{\partial x} \\ c &= c(\pi, \eta) \end{aligned} \quad (3)$$

式中： x 为单元立体弧度质量坐标， τ 为时间， λ 为欧拉半径， η 为密度， β 为质点速度， π 为压力， c 为声速， $\gamma_0 = 1.4$ 。

将上述方程组以激波半径为单位进行激波变换，然后可以用二阶隐式格式激波装配法求解。初步计算结果见图 4。

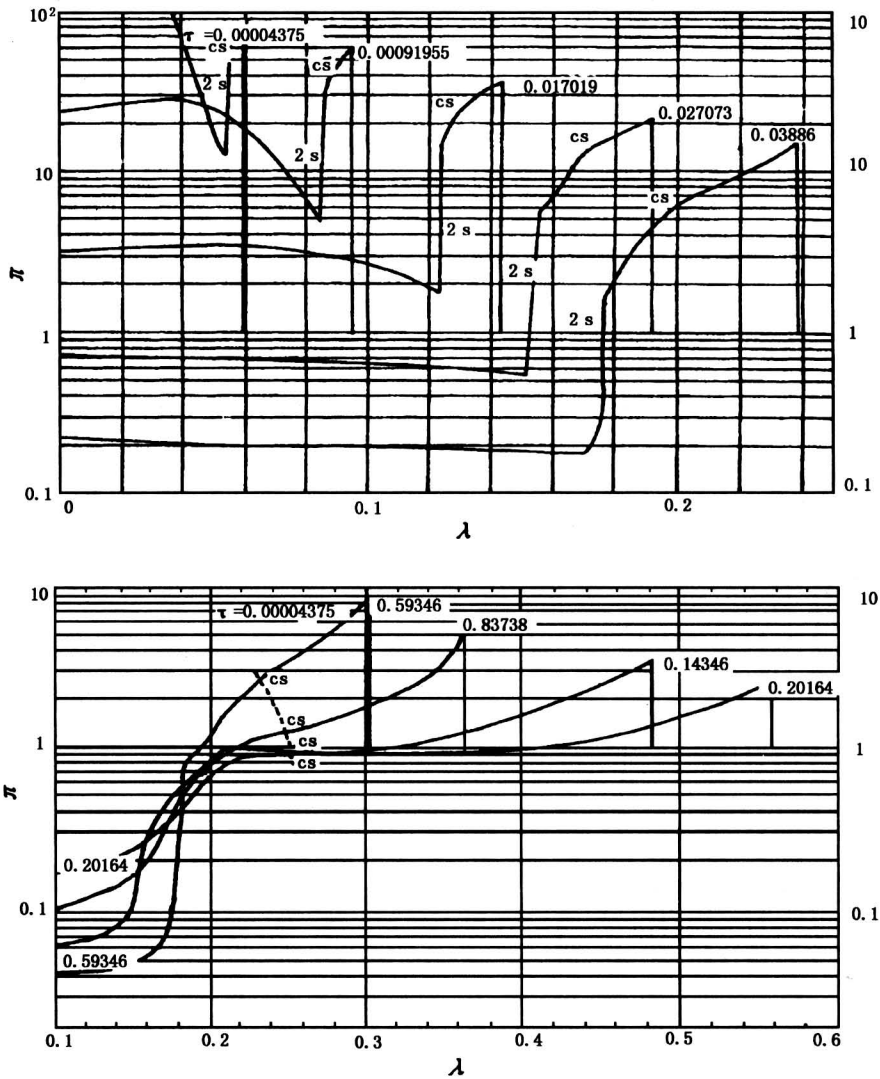


图 4 TNT 爆炸给定时间条件下压力 ($\pi = P/P_0$) 与半径 (λ) 的关系

Fig.4 Pressure ($\pi = P/P_0$) versus radius (λ) at indicated time for a TNT blast

下面分析凝聚态 TNT 炸药爆炸多变的激波波系及其物理特征。

1) 爆炸主激波的运动 TNT 爆轰完成后, 间断产生分解, 向空气中传入的初始主激波超压约为 50 MPa, 随着主激波向外运动, 主激波强度不断减小。

2) 接触间断分解后内传的稀疏波, 在球对称收敛运动的条件下, 发展为强度迅速增长的二次激波。此激波遇爆心撞击反射成为向外运动的二次激波之前, 爆心区仍有较高的爆轰产物压力, 其压力幅值远远大于空气主激波。这是凝聚态炸药爆炸近区的典型物理特征。

3) 主激波和二次激波经爆心撞击反射之后向外运动, 二次激波的传播速度以远比主激波为低的速度减慢下来, 进入了主激波的负相区, 继续追随主激波运动。

4) 二次激波向外运动经过接触间断面时, 反射回来一个稀疏波, 在球形收敛运动的条件下, 又发展为强度增长的激波, 此激波遇爆心反射成为三次激波向外扩张运动, 追随于二次激波之后。同理形成四次激波追随于三次激波之后。多次激波都向外运动, 追随于空气中主激波之后, 进入了主激波的负相区。这是凝聚态炸药爆炸远区的物理特征。

4.2 高能量密度爆炸的物理模拟

空气中高能量密度爆炸效应的物理模拟需要从以下 3 个方面展开: a. 光辐射的物理模拟; b. 近区空气冲击波的物理模拟; c. 远区空气冲击波的物理模拟。

高能量密度爆炸光辐射和近区空气冲击波的物理模拟如果依靠实验来进行几乎是不可能的, 用数值模拟为手段, 并和现场高能量密度爆炸获取的火球发展与激波到达时间数据相比较, 确认了数值模拟的可靠性。

高能量密度爆炸远区空气冲击波的模拟, 可以采用化学爆炸或导线爆炸为手段来实现试验物理模拟。虽然化学爆炸存在爆轰产物的影响, 导线爆炸存在金属蒸气的影响, 但是当冲击波发展到远区, 超压降为 10 MPa 以下时, 其影响已经大为减少, 可以对空气冲击波主要特性进行模拟, 包括超压峰值随距离衰减、定点超压波形随时间变化、超压正压时间和激波到达时间。值得注意的是从 10 MPa 到 1 MPa 的模拟精度不可能很高, 通过高能量密度爆炸和化学装药 TNT 爆炸实测冲击波参数的比

较证明, 只有在超压为 1 MPa 以下时才能实现准确定量模拟。这是由于二个原因造成的: a. 相应 10 MPa 到 1 MPa 这个范围, 高能量密度爆炸扰动区内的总能量不是不变的, 它恰恰是相应于辐射损失自火球内部经过激波阵面逸出到无穷远这个时期, 辐射损失能量高达 30% 以上, 不能忽略其影响。b. 在 10 MPa 到 1 MPa 这个范围, 凝聚态 TNT 爆炸特有的强接触间断和爆轰产物对于主激波后的波形变化还是有影响的, 这也是导致模拟不准确的原因。

基于上述分析可以认定: 采用凝聚态 TNT 装药模拟高能量密度爆炸在一定范围内是可行的。在空气中爆炸时, 当超压为 10 MPa 以下时, 可以用 TNT 装药爆炸对高能量密度爆炸进行定性模拟; 当超压为 1 MPa 以下时, 可以用 TNT 装药爆炸对高能量密度爆炸进行准确定量模拟。由此可以推测, 对于高能量密度侵彻耦合爆炸, 可以采用 TNT 装药进行模拟, 估计对 10 MPa 以下的空气冲击波和密实介质中的应力波可以进行定性模拟。通过不同埋深 TNT 耦合爆炸试验, 可以给出对于密实介质的能量耦合系数, 从而给出高能量密度侵彻爆炸的能量耦合初步结果。

5 爆炸次生洪水波灾害防护探讨

1944 年, 第二次世界大战期间英军轰炸了德国的敏尼水坝和爱德水坝, 使两亿立方米洪水突然下泄, 破坏了电站和船闸, 造成了许多生命财产损失。1952 年, 英军在朝鲜战争中, 又集中轰炸了石岩、慈山两个水坝, 淹没平壤部分地区, 形成了巨大的灾害。1975 年 8 月我国淮河上游河南境内的板桥、石漫滩水库, 由于上游连降暴雨导致流域洪峰叠加, 造成洪水漫溢土坝, 在短短 4 h 内, 大坝全部冲毁, 涌浪激波像一面墙一样排山倒海倾泻而下, 淹没 4 个地区 29 个县, 冲毁城镇, 冲毁农田, 造成大量人员淹亡。

我国有 6 大内河水系, 包括松花江、辽河、黄河、淮河、长江和珠江流域, 地域广阔, 人口密度很高, 入海口大多在我国海域内。自 70 年代以来, 随着国家经济建设的迅速发展, 我国各主要江河上游, 特别是在六大内河水系上游, 为了解决防洪、灌溉和发电的要求, 在上游兴建了大量水利枢纽。

上游水库的大量兴建, 从积极方面说促进了经济建设发展, 减少了洪涝灾害的威胁, 但是另一方

面潜在的危險也迅速增长。土坝在洪水漫顶和爆炸决口时是极不安全的,在高速水流冲刷下,土坝在数小时内就可能完全溃决。根据我国溃坝情况统计,在溃坝总数中土坝最多占98%,堆石坝占1%,混凝土坝极个别出现溃坝。

大坝溃决灾害的严重性主要表现在二方面,一个是洪水涌浪激波的破坏性极其巨大,在数米甚至几十米涌浪激波前锋冲击下,任何建筑物、铁路、桥梁都会立即遭到破坏。另一方面是溃坝引起的洪水流量极其惊人,板桥水库库容6亿 m^3 ,溃决后4h洪峰流量高达78000 m^3/s ,超过了我国1998年长江汛期最大洪峰流量。

洪水波灾害防护研究的主要目的是要给出我国主要江河水利枢纽受空袭后洪水波涌浪激波的破坏效应和洪峰流量对于城乡居民安全与工业经济目标造成的巨大灾害,研究给出洪水波的防护措施。

通常洪水演进的形式包括的江河汇流、分流、扩散和漫溢,在破坝产生洪水波条件下,会以更加剧烈的形式出现。洪水波灾害防护研究应当以坝址上下游水道稳态径流和实际河道与泛区地形为初始条件和边界条件,利用不可压缩流体动力学方程组按破坝模型进行计算,通过计算给出沿河道洪水波涌浪激波高度时程变化、洪峰流量的推进位置和洪水淹没范围。

破坝问题是一个典型的不定常流体动力学洪水波问题,它除了包括随时间变化的不定常效应外,还包括间断流动效应,即出现涌浪激波。描述包含间断的不定常流动方程为质量守恒积分方程^[8]:

$$\frac{d}{dt} \int_{x_2}^{x_1} A(x,t) dx + q(x_1,t) - q(x_2,t) = 0 \quad (4)$$

一般河道是变断面的,具有二维特性,可以建立一般形式守恒方程^[9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} &= S_0^x - S_f^x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} &= S_0^y - S_f^y \\ S_0^x &= g \frac{\partial h_0}{\partial x} \\ S_0^y &= g \frac{\partial h_0}{\partial y} \end{aligned} \quad (5)$$

$$S_f^x = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{C_u^2 h^{4/3}}$$

$$S_f^y = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{C_u^2 h^{4/3}}$$

式中 $h_0(0, x, y)$ 为初始稳态水深, $h(t, x, y)$ 为动态水深, $u(t, x, y)$ 为 x 方向流速, $v(t, x, y)$ 为 y 方向流速, S_0^x, S_0^y 为 x 与 y 方向水力摩阻坡降。 n 为曼宁糙率系数, $C_u=1$ 。 g 为重力加速度。

上述流体动力学方程是考虑河底边界水力摩阻并略去动量方程中的垂直加速度作用而得到的长波方程组。目前国外经常用此类方程求解^[10]。由于水力摩阻可以从稳态流动推算,计算结果可以反映实际情况。如果给出涌浪激波满足的关系式,在河道为渐变流动的条件下,可以采用精确的激波装配法求解。

为了提高数字地形图利用精度,在坐标变换中,要采取相应高精度计算的二维曲面样条插值方法。这样做也可以避免不合理的引入虚拟涡旋。数字地形图的输入和洪水波的数值计算结果可以用仿真技术动态地大视野地展现出来。在虚拟流域地形图中有山谷和河床以及稳态河水流动,数值计算的洪水波涌浪激波前锋推进过程可按适当的时间比例尺叠加上去。水面标志质点的数据由数值计算提供,全景透视观察点可以选成固定岸边观察点或者空中机动点。

6 结语

高能量密度爆炸由于物质的辐射迁移运动和流体动力学运动是耦合的,表现了辐射波和冲击波的多样性,但当冲击波超压衰减到1200MPa以后,强击波已经完全形成。此后的物质运动形式已经变成纯空气冲击波为主。化学炸药爆炸,当空气冲击波压力衰减到10MPa以后,爆炸产物压力的影响也可以忽略。据此,在空气冲击波10MPa以下的范围内,可以利用化学爆炸模拟高能量密度爆炸的空气冲击波作用和在岩土介质中的耦合爆炸作用。

高能量密度爆炸、化学爆炸产生的冲击波可以直接引起灾害,也可以引起毒气散逸、连片大火、洪水波等次生灾害。研究爆炸破坏效应与次生灾害效应及其防护技术是涉及国计民生的重大任务,相信依靠我国自己的技术力量,通过大力合作,一定可以圆满完成这项历史性的任务。

参考文献

- [1] 周丰峻, 张六一, 施光甫. 高能量密度爆炸辐射流体动力学计算 [A]. 防护计算工程论文集 [C], 1979
- [2] Zhou Fengjun, Shi Guangpu. Radiation wave and shock wave of the spherical explosion [A]. 8th International Proceedings of the Interaction of the Munitions Effects with Structures [C], McLean Virginia US, 1997
- [3] Охоцимский Д. Е. Расчёт точечного взрыва с учётом противодействия [A]. 流体力学论文集 [C]. 第 5 卷. 北京: 流体物理与应用数学研究所, 1957
- [4] Brode H L. Point Source Explosion in Air. RM-1824-AEC [M]. USA, 1956
- [5] Кузнецов Н. М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах [M]. Москва, 1965
- [6] 周丰峻, 施光甫. 真实空气中点源爆炸冲击波计算 [J]. 防护工程, 1980, (1): 40~50
- [7] Zhou Fengjun, Shao Kaijin. Calculation for blast wave of the spherical TNT charge with shock fitting technique [A]. 9th International Proceedings of the Interactions of the Munitions Effects with Structures [C], Bonn Germany, 1999
- [8] Whitham G B. Linear and nonlinear waves [M]. John Wiley and Sons Inc, 1974
- [9] 谢任之. 溃坝水力学 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1989
- [10] Harlow F H, Welch J E. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface [J]. Physics of Fluids, 1965, 8: 2182~2187

The Physical Characteristic of the High Energy Density and the Chemical Explosions and Discussion on the Effects of Flood Wave Due to Explosions

Zhou Fengjun

(Luoyang Hydraulic Engineering Research Institute, Luoyang, Henan 471023, China)

[Abstract] Based on results of radiate-hydrodynamic and TNT charge hydrodynamic blast wave calculations, the physical characteristic in close- in and distance regions of two kinds of explosions and the development of different blast wave systems are studied. Some important conclusions for protection engineering are obtained. Also, flood wave disasters due to two kind explosions are discussed and great meaning of protection engineering for flood wave are described.

[Key words] high energy density explosion; chemical explosion; shock wave; flood wave

* * * *

塑料芯片将扮演硅芯片的终结者

剑桥大学的技术专家们正研制一种新型塑料芯片, 以取代成本高昂的硅片。一分析人士表示, 这种技术就像是一部“造钱机器”。

专家们研制出的塑料属于聚噻吩和低聚噻吩家族。但其属性必须能够得到极精微的控制, 才足以挑战硅片的龙头老大地位。

制造成本将是塑料芯片的最大优势。目前一家半导体制造厂的建设 and 启动成本高达 20 亿美元, 这使得芯片成本始终居高不下, 达数美元一块。而塑料芯片的成本仅几美分而已。

据预测, 在 2004 年以前, 塑料芯片行业的总价值平均每年约为 100 亿美元。而硅片行业的年平均总价值目前已达到 2000 亿美元, 预计到 2004 年将高达 10000 亿美元。这种新型的芯片很有可能杀入一些无法承受硅片高昂成本的领域, 例如超市用的条形码扫描仪。

目前已有多家 IT 业大公司宣布成立了塑料芯片的研究项目, 如 IBM、三菱、日立、朗讯、施乐、飞利浦、Hoechst, 但尚未有一家制定投产计划。