

温压炸药爆炸抛撒初期的数值模拟

郑波¹, 陈力², 丁雁生², 王志芳¹

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京, 100081; 2. 中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

摘要: 采用高速运动分析系统, 对装填固态燃料的抛撒装置进行观测, 分析爆炸抛撒过程及爆炸火球的发展过程。提出合理的基本假设, 建立可行的数学模型, 采用全二阶精度的 MacCormack 有限差分方法, 进行数值研究。结果表明, 计算结果和实验结果基本相符

关键字: 爆炸力学; 爆炸抛撒; 固态燃料; 数值模拟

1. 引言

温压炸药是近几年国外发展的一种新型炸药。在杀伤效能方面, 温压装药在有限的空间内爆炸, 产生冲击波和热气流, 对藏匿其中的设备和系统造成严重的损毁; 同时它还能迅速消耗有限空间的氧气, 导致爆炸区内的人员窒息。这与传统的高能炸药不同。因此研究装填固态燃料的温压炸药的爆炸机理和爆炸性能, 在军事工程、爆炸灾害防治等方面有着重要的意义。

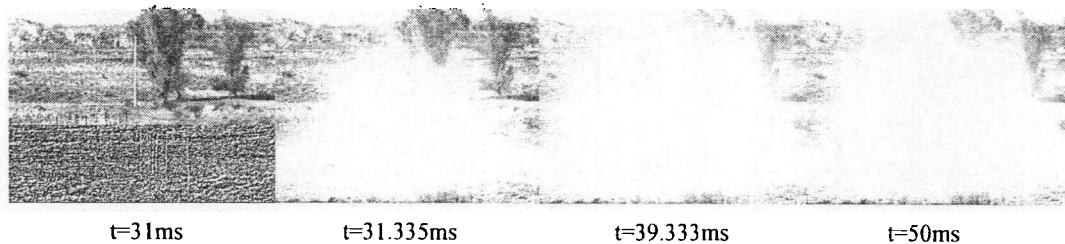
温压炸药的爆炸抛撒及火球形成过程是一个相当复杂的问题, 全面和精确地描述该问题的物理现象, 需要进行大量的原理实验、外场实验和理论研究。本文拟以从高速摄影仪器拍摄到的实验过程, 分析装填固态燃料的温压炸药爆炸抛撒初期发生的主要现象, 提出合理的可行的基本假设和数学模型, 进行数值模拟研究。

2. 实验过程

采用高速运动分析系统, 对装填固态燃料的抛撒装置进行观测, 结果如图 1, 它清晰地给出了爆炸抛撒过程及爆炸火球的发展过程 (每毫秒记录 3 帧):

从图 1 可以看出爆炸火球的形成和发展过程: 刚起爆一两毫秒, 爆炸光球 (31.3ms 和图 2) 迅速膨胀, 越出视场后录像为一片白光。约三毫秒光球消失, 显现出火球, 周围有虚光。随后火球缓缓膨胀, 虚光渐弱; 爆后约六十到一百毫秒, 火球与虚光渐失, 逐渐显出白亮的烟云边界。所谓“虚光”, 是火球的强光照亮的周边空气中水汽和微尘的影像。然后烟云开始升腾, 爆后一百二十毫秒逐渐发展成一定尺度的蘑菇云。温压炸药的固态燃料在烟云区内燃烧, 如图 3。此后, 爆轰产物、氧化产物和未反应完全的固态燃料组成的蘑菇云团升腾并随风消散。这就是爆炸火球及蘑菇云团演化的图像。图 2 为起爆初期的爆炸光球。

由前面的爆炸初期阶段发生的实验现象, 观察到中心装药管破碎、固态燃料在高温高压的强激波诱导下点火、与空气中的氧气发生氧化反应, 而氧化反应释放出的热量反而有助于减缓爆轰冲击波衰减的速率、固态燃料抛撒。因此, 必须对该过程进行简化, 提出合理的基本假设, 建立可行的数学模型, 采用合适精度的有限差分方法, 进行数值研究。



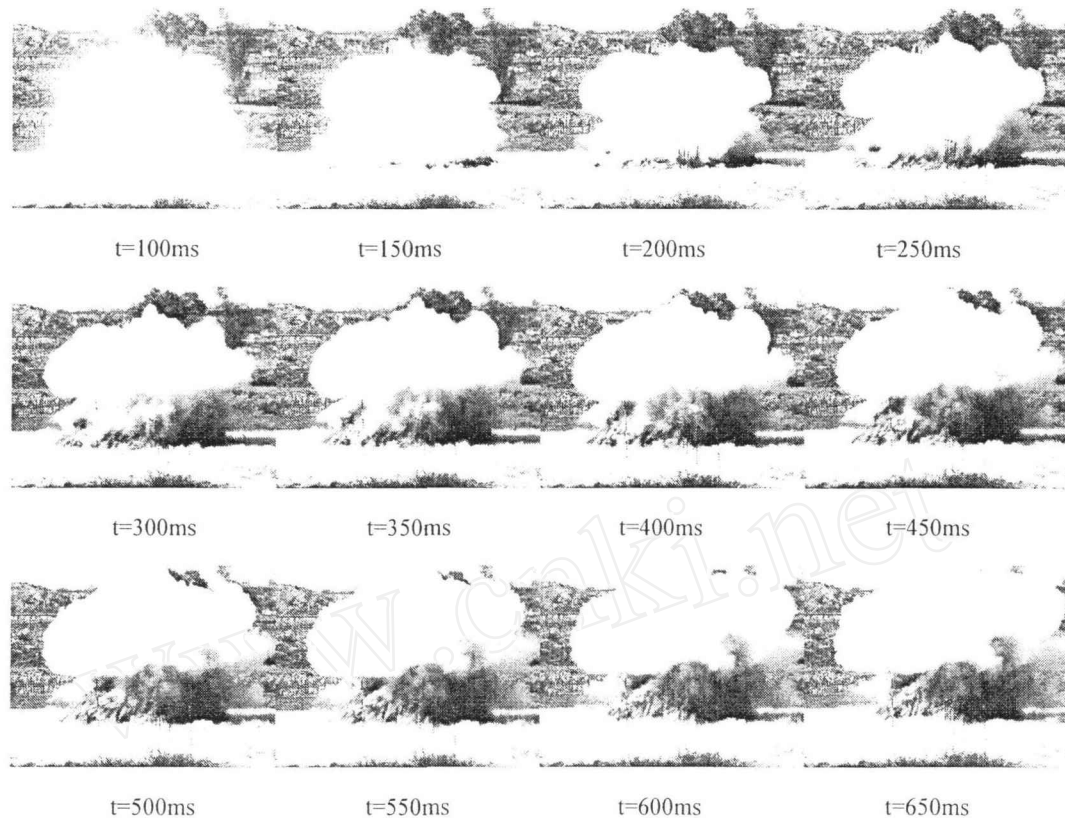


图 1 固态燃料爆炸抛撒过程的分幅照片

Fig 1 Pictures of explosive dispersal process of solid fuels

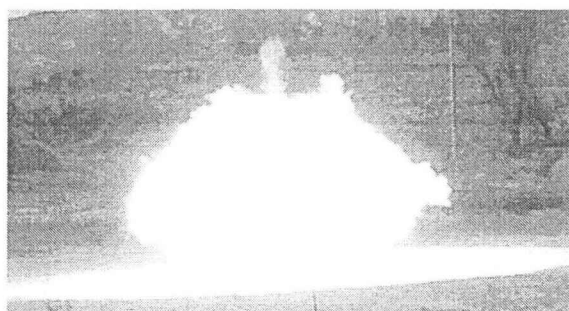


图 2 起爆初期的爆炸光球

Fig 2 the initial detonation of explosive glittering sphericity

3. 数学模型

为了更加清楚地认识装填固态燃料的温压炸药爆炸抛撒机理和基本规律，做出如下基本假设：流场是一维非定常、球对称的；中心炸药爆炸考虑瞬时爆轰模型，爆轰产物气相为理想气体；处于同一时空位置的气相混和物中的各种气体具有同一温度，初始时刻处于高温，随后发生向固相发生相间温差传热，当气体膨胀降温到一定程度后，固相氧化反应时释放出大量的热量，这些热量反过来向气相传热；固态颗粒分布在爆轰产物气相介质中，视为连续介质；固态颗粒的初始直径相同，且抛撒过程中保持球状；颗粒内部温度是均匀分布的；初始时刻处于常温，随后因相间传热而升温；固态颗粒间的相互作用暂时不计；仅考虑两相对流热传导，忽略其他性质的导热；两相之间仅考虑简单的化学反应引起的相变，以及由此引起的动量、能量传递；附加质量力、Basset 力、升力、Magnus 力和 Saffman 力等可以忽略不计，不考虑重力效应；不考虑气相组分

的湍流脉动；不考虑气体内分子传输过程、以及粒间 kinetic 碰撞传输等伴随着的粘性和热传导。

考虑一维球对称问题，爆心位于坐标原点，采用气固两相流模型研究固态燃料爆炸抛撒初期问题。描述气体和颗粒的运动方程如下：

1) 气相质量：

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + u_g \frac{\partial \rho_g}{\partial r} + \rho_g \frac{\partial u_g}{\partial r} + \frac{\rho_g}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_g \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + \frac{2\rho_g u_g}{r} = 0$$

2) 固相质量：

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_p \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} - (1 - \varepsilon) \frac{\partial u_p}{\partial r} - \frac{2(1 - \varepsilon)u_p}{r} = 0$$

3) 气相动量：

$$\frac{\partial u_g}{\partial t} + u_g \frac{\partial u_g}{\partial r} + \frac{1}{\rho_g} \frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{f_p}{\varepsilon \rho_g}$$

4) 固相动量：

$$\frac{\partial u_p}{\partial t} + u_p \frac{\partial u_p}{\partial r} + \frac{1}{\rho_p} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{f_p}{(1 - \varepsilon)\rho_p}$$

5) 气相能量：

$$\varepsilon \rho_g \left[\frac{\partial e_g}{\partial t} + u_g \frac{\partial e_g}{\partial r} \right] + p \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_g \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right] + \varepsilon p \frac{\partial u_g}{\partial r} + 2\varepsilon \frac{pu_g}{r} = f_p(u_g - u_p) - Q_p$$

6) 固相能量：

$$\beta \rho_p \left[\frac{\partial e_p}{\partial t} + u_p \frac{\partial e_p}{\partial r} \right] = Q_p$$

7) 状态方程：

$$p = (\gamma - 1)\rho_g e_g$$

注：下标“p”和“g”分别表示气相、固体颗粒相。

其中： ε 为气相的体积分数，颗粒相体积分数 $\beta = 1 - \varepsilon$ ， p 为压力， ρ 、 u 分别为密度、速度，

e 为内能， $e = c_v T$ 。

f_p 为两相间作用力，其表达式可以写为：

$$f_p = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho_g \rho_p}{D_p \sigma_p} (u_p - u_g) |u_p - u_g|$$

这里 σ_p 为颗粒相的材料密度， D_p 为颗粒直径， ρ_g 、 ρ_p 分别为气相、颗粒相的浓度或表

观密度, C_D 是阻力系数

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) & (Re) < 800 \\ \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) + \frac{0.42}{1 + 42500 Re^{-1.16}} & (Re) \geq 800 \end{cases}$$

Q_p 为相间热传导, 其表达式可以写为

$$Q_p = 6 \frac{\rho_p C_p \mu_g}{D_p^2 \sigma_p} \frac{Nu}{Pr} (T_p - T_g)$$

这里 $Pr = \frac{C_p \mu_g}{\lambda}$ 是普朗特数, C_p 为定压比热。

Nu 为 Nussel 数, $Nu = 2 + 0.459 Re^{1/2} Pr^{1/3}$ 。

Re 为 Reynolds 数, λ 为气相导热系数, μ_g 为粘性系数

$$Re = \frac{\rho_g D_p |u_p - u_g|}{\mu_g}, \quad \mu_g = \frac{C_1 T_g^{3/2}}{C_2 + T_g}, \quad \lambda = \frac{C_3 T_g^{3/2}}{C_4 + T_g},$$

这里 $C_1 = 0.1546 \times 10^{-5} s \cdot Pa$, $C_2 = 240.9K$, $C_3 = 0.00353 W / (m \cdot s \cdot K)$, $C_4 = 648.42K$ 。

4. 计算结果与分析

采用时空全二阶精度的 MacCormack 差分格式加上 FCT 技术求解气固两相流方程组, 自行编制程序, 预测爆炸初期气固两相速度、气相压力等物理量的分布。

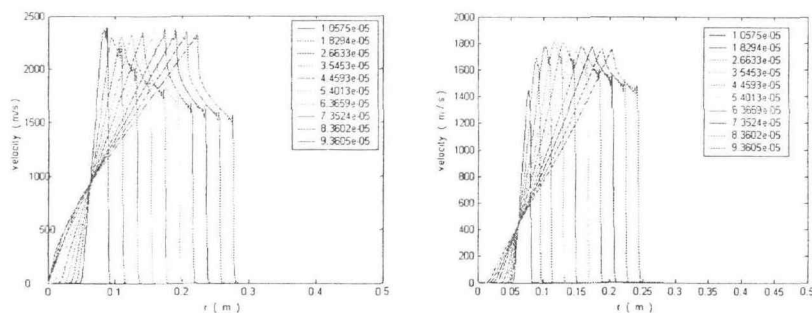


图 3 不同时刻气相速度、固相速度沿径向的分布

Fig 3 gas-phase and solid-phase velocity distribution at different time

图 3 中颗粒直径为 $275 \mu m$ 不同时刻气、固两相速度沿径向的分布。计算结果表明两相速度均为很短的时间内达到很大的速度。

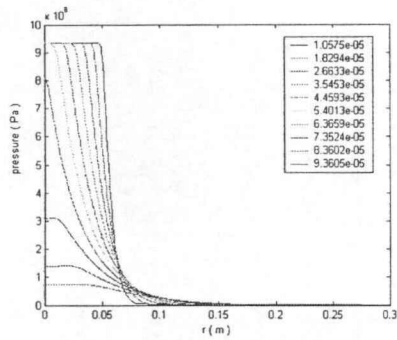


图 4 不同时刻压力沿径向的分布

Fig 4 Pressure distribution at different time

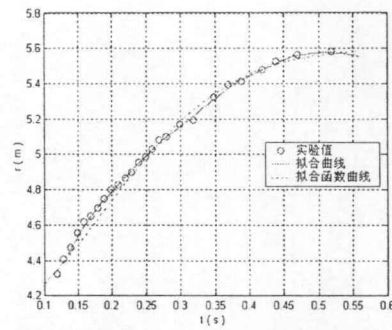


图 5 6kg 级云团半径随时间变化曲线

Fig 5 Radius-time curve for 6 kg cloud

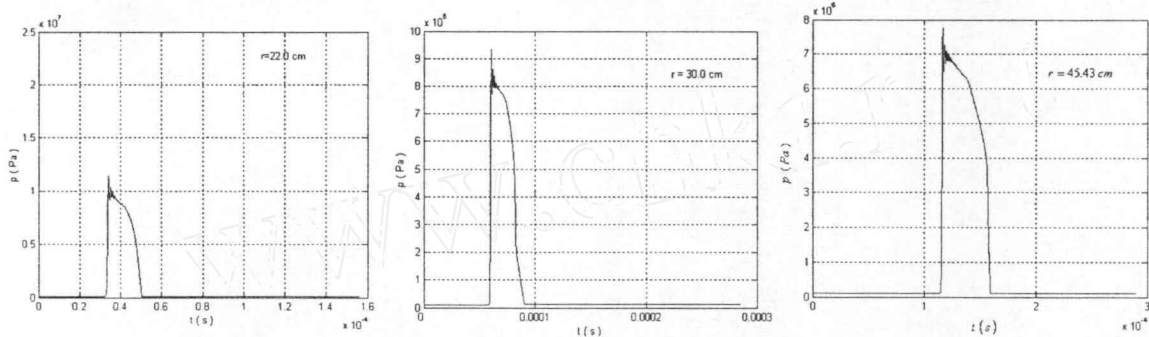


图 6 不同位置处压力与时间的关系

Fig 6 Relation of gas-phase pressure and time at different positions

图 4 给出了颗粒直径为 $275 \mu\text{m}$ 不同时刻压力沿径向的分布: 爆炸早期压力衰减很快。

图 5 为 6kg 级温压炸药云团半径随时间变化曲线与图 1 中实验值的比较, 曲线表明, 计算所得的云团外形变化能够反映出云团的实际运动规律。

图 6 给出了距离爆心距为 22.0 cm、30.0 cm、45.43 cm 处压力与时间的关系曲线: 在爆炸冲击波传播到该处之前, 该点的压力处于标准大气压状态; 一旦传播到该点时, 压力立即增加到某一有限值, 随着时间的发展, 该处的压力值逐渐衰减为远离的状态。这些压力历程曲线表明该处的压力还没有受到地面目标的影响。

数值计算的结果表明, 数学模型和数值计算方法是合理的, 对确定爆炸初期重要参量如压力、气固两相速度、浓度等具有一定的指导意义。数值模拟采用均一粒径的假设, 与事实不符, 以后应考虑不同直径范围的固态颗粒。考虑抛撒装置初期的轴向效应, 需要将近场阶段气固两相运动的一维模型发展成二维模型。本文提出的数学模型和计算方法仍存在不足, 仍需进一步加强数值模拟工作, 完善求解温压炸药爆炸抛撒全过程的模型和数值方法。

参考文献:

- [1] F.Zhang, D.L.Frost, P.A.Thibault, S.B.Murray . Explosive dispersal of solid particles, shock waves, Vol 10, 2001, pp.431-443
- [2] 北京工业学院《爆炸及其作用》编写组 . 爆炸及其作用 (下册) [M], 国防工业出版社, 1979
- [3] 王志芳. 固态燃料爆炸抛撒的实验、理论及数值研究[D], 北京: 北京理工大学, 2006
- [4] J.M.Powers, D.S.Stewart and H.Krier . Theory of two-phase detonation-Part 1 :Modeling, Combustion and Flame, 80:264-279(1990)

[5] J.M.Powers, D.S.Stewart and H.Krier . Theory of two-phase detonation-Part II :Structure, Combustion and Flame, 80:264-279(1990)

The numerical simulation on the explosively dispersed solid fuels in the near field

Zheng Bo^[1], Chen li^[2] , Ding yansheng^[2] ,Wang Zhifang^[1]

(1. State key laboratory of explosion science and technology, Beijing institute of technology, Beijing , 100081;
2. Institute of Mechanics, CAS, Beijing , China , 100080)

Abstract: The dispersal equipment of solid fuel was observed taken use of high-velocity moving analysis systems. Explosive dispersal process and development process of explosive fire spherical were analysed. Reasonable basic assumptions were put forward and feasible mathematics model was established , and a time and space second-accuracy MacCormack scheme was used and numerical study was carried out. Results indicated that calculated results are in good agreement with the experimental results.

Keywords: mechanics of explosion; explosive dispersal; solid fuel; numerical simulation