

文章编号: 1006-9941(2001)03-0136-03

# V形槽内爆炸抛撒水雾形成过程的数值研究

丁珏, 刘家骢

(南京理工大学化工学院 319 教研室, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 惰性物质悬浮于空气中形成的云雾(例如水雾)能阻挡或抑制火焰和激波传播。对 V 形槽内装的水进行爆炸抛撒, 以形成一定体积的水雾, 能抑制火焰和激波的传播。对此装置的爆炸抛撒水雾形成过程进行数值模拟, 计算和试验结果有较好的一致性。

**关键词:** 爆炸抛撒; 抑制

**中图分类号:** O389

**文献标识码:** A

## 1 引言

在工业生产中, 特别是易燃易爆物的生产、加工、运输和储存过程中, 生产的安全问题已经成为人们最关注的问题之一。因此, 研究工业爆炸灾害的防治(其中包括抑制技术)有着重要的意义。

瓦斯爆炸、粉尘爆炸和气云爆炸是工业爆炸灾害的主要形式。这类爆炸灾害的发生和发展, 一般都有一个燃烧转爆轰(DDT)的过程。特别是在矿井、管道、粮仓以及设施密集的厂房中, 一旦发生可燃可爆混合物的点火, 则最易于发生 DDT。因此在这些情况下, 采用防爆抑爆系统以阻止 DDT 的发生是有效的手段。其作用原理是, 如果发生点火, 利用火焰波发生的信号去触发该系统, 将抑爆剂释放出来, 以阻止火焰加速, 并将其扑灭。抑制剂一般是微小的惰性颗粒, 多为固体, 也可以是液体。研究表明, 在可能发生火焰加速的通道上, 预置 V 形槽, 槽内盛置水, 用爆炸抛撒的方式来形成水雾, 从而达到抑制和熄灭火焰, 以及使爆炸混合物惰性化的目的。使用证明, 它具有系统简单、实用和效果好等特点, 是较好的火焰抑制器和爆轰抑制器之一。本文在前人试验的基础上, 采用数值方法模拟水雾的形成过程, 得到较好的结果。

此外, 文献[1]利用 V 形槽装置抛撒液体燃料, 以形成大规模的无约束燃料空气云团即 FAE, 这是 V 形槽的另一应用方向。因此, 对 V 形槽的爆炸抛撒和水雾形成过程进行研究有较大的理论意义和实用价值。

收稿日期: 2000-11-26; 修回日期: 2001-05-14

作者简介: 丁珏(1973-), 女, 博士, 研究方向为计算爆炸力学、多相流理论及应用, 发表论文 6 篇。

## 2 物理数学模型

文献[2]对此类线性爆炸抛撒装置的水雾形成过程进行了试验研究。文中使用钢制的直角 V 形槽, 槽的尺寸为  $0.16\text{ m} \times 0.16\text{ m} \times 5.0\text{ m}$  在槽的凹处, 平铺一根  $5.0\text{ m}$  长的导爆索, 其装药线密度为  $2\text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$  的太安炸药。槽的两端封闭, 用来盛置一定质量的水。沿着槽的长度方向每隔  $0.5\text{ m}$  焊接一根加强杆, 防止爆炸时产生的过度变形。V 形槽的结构示意图见图 1。使用两架高速摄影机, 分别从正面和侧面观察被抛撒水雾的形成及发展过程。

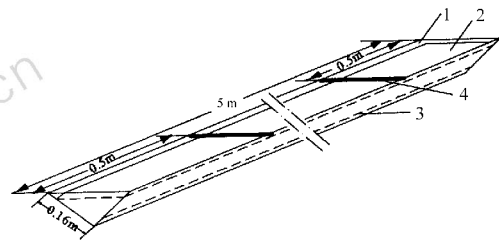


图 1 V 形槽的结构示意图

1—直角钢槽, 2—水, 3—导爆索, 4—加强杆

Fig. 1 Schematic of the steel V-channel

1—angle steel, 2—water, 3—explosive cord, 4—reinforce bar

### 2.1 物理模型

当槽内导爆索发生爆轰后, 激波、爆轰产物气体与水发生相互作用。界面不稳定发展的初期, 在气水界面上形成很多小尖峰, 这是最初水雾的边界。随着时间推移, 界面的不稳定性逐渐发展成混合阶段, 即两种流体(气、水)相互渗透, 相互混合, 形成水雾。

对于这类由流体动力学不稳定性发展成的混合情况, 研究混合区内气液相质量分数分布是展示混合程

度的有效方法。因此,本文建立以下模型,对 V 形槽爆炸抛撒水雾形成过程进行了数值计算。

### 2.2 数学模型

模型基本假设:

(1) 忽略气体与水的粘性,且爆轰产物气体为完全气体。

(2) 不考虑 V 形槽内导爆索的爆轰过程,即设初始时刻在爆源处有一高压气团,炸药释放的大部分能量以气体内能的形式贮存在高压气团内。

直角坐标系下,控制方程如下所示:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial y} + \frac{\partial \rho v}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p)}{\partial y} + \frac{\partial \rho uv}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} + \frac{\partial (\rho v^2 + p)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial u(e + p)}{\partial y} + \frac{\partial v(e + p)}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \frac{\partial \rho u C}{\partial y} + \frac{\partial \rho v C}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

其中:  $y$  为垂直坐标,  $x$  为水平坐标。

以上方程可以看成是统一的五个守恒型联立方程组,求解十分方便。但文献[3]指出,求解第(5)式的非守恒形式更有利于提高变量的精确度,因此本模型的计算中采用它的非守恒形式。

在利用网格计算中,会出现纯气体网格、纯水网格及混合格网(即在一个网格中同时有水和气体)。混合格网的压力、能量关系式<sup>[4]</sup>如下所示:

$$p = \rho T [ CR_g + (1.0 - C)K_w ] - (1.0 - C)B$$

$$e = \frac{1}{2}\rho(u^2 + v^2) + \frac{c_{vg}C + (1.0 - C)c_{vw}}{CR_g + (1.0 - C)K_w} [ p + (1.0 - C)B ] + (1.0 - C)B + \rho gy$$

其中:  $p, \rho, u, v, e$  分别为压力、密度、 $y$  方向上的速度、 $x$  方向上的速度及单位体积内的能量;  $c_{vg}$  和  $R_g$  分别表示气体(空气)的等容比热和气体常数;  $c_{vw}$  表示水的等容比热;  $K_w$  为常数<sup>[4]</sup>;  $B$  为水状态方程中的常量,取为  $3.0 \times 10^8$ ;  $C$  表示气体的质量分数,它是模型中反映抛撒过程中气、水混合情况的重要参数。其具体含义是:  $C = 1.0$ , 表示网格内全为气体;  $C = 0.0$  表示网格内全为水;  $0.0 < C < 1.0$  表示混合格网内气体的质量分数。因此,计算中不需要对空气和水分别进行计算。

### 3 数值结果与分析

V 形槽装置内单位长度所装填水的质量与固体炸

药质量之比,被称为装填比。本文对文献[1]试验的装填比为 1 500 : 1 V 形槽中爆炸抛撒水雾形成过程进行数值模拟。

在试验中,得到的是向上发展的水雾边界随时间变化的情况。从图 2 的试验结果与计算结果的对比来看,两者符合得较好。图 3、4 为 0.11 ms 时刻液相质量分数的空间分布图和等势图。图 5、6 为 20.0 ms 时刻液相质量分数的空间分布图和等势图。从图中发现,随着时间的发展,气、液相沿着径向和轴向运动,液相逐渐展开,且液相质量分数的峰值也不断下降。

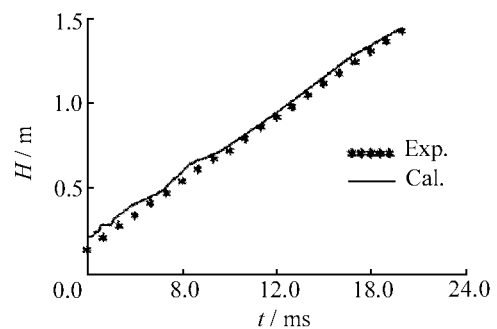


图 2 水雾边界的运动轨迹

Fig. 2 Boundary trajectories of the water cloud

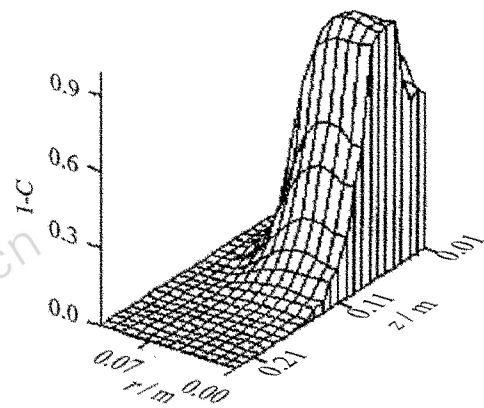


图 3 0.11 ms 时刻液相质量分数分布图

Fig. 3 Liquid mass fraction profile at 0.11 ms

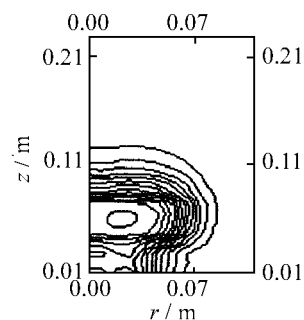


图 4 0.11 ms 时刻液相质量分数等势图

Fig. 4 Liquid mass fraction contours at 0.11 ms

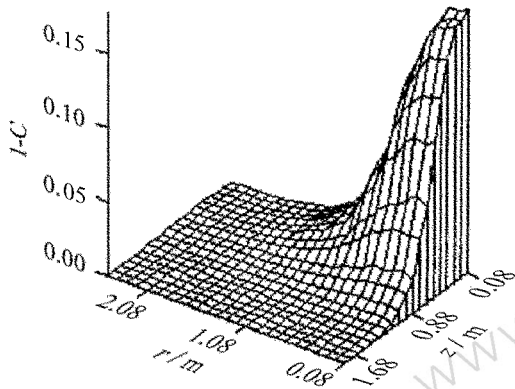


图5 20.0 ms时刻液相质量分数分布图

Fig. 5 Liquid mass fraction profile at 20.0 ms

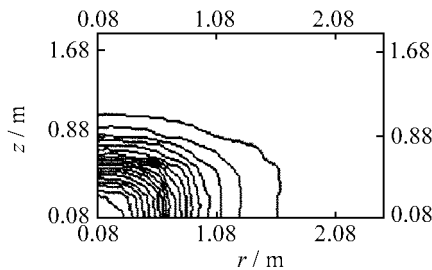


图6 20.0 ms时刻液相质量分数等势图

Fig. 6 Liquid mass fraction contours at 20.0 ms

## 4 结论

对V形槽装置爆炸抛撒水雾的形成过程进行数值模拟,计算所得水雾边界运动轨迹与试验结果吻合得较好。此外,计算还能预测水雾区内其它物理量的分布与变化情况。计算结果符合V形槽装置抛撒水雾形成的物理现象和规律,说明了本文采用的物理模型和数值算法是合理和可行的。

### 参考文献:

- [1] Benedick W B, Tieszen S R, Knystautas R, et al. Detonation of unconfined large-scale fuel spray-air clouds. *Progress in Astronautics & Aeronautics, Dynamics of detonations & Explosions* [J]. *Detonations*, 1991, 133: 297 - 309.
- [2] XU Tianrui, GIN Xiang, Lee J H S. Suppression of dust explosion by the explosive dissemination of water[J]. *Archivum Combustionis*, 1989, 9(1): 405 - 411.
- [3] Mudler W, Osher S, Sethian J A. Computing interface motion in compressible gas dynamics [J]. *J. Comput. Phys.*, 1992, 100: 209 - 228.
- [4] 王智平. 近水面核爆炸的数值研究[D]. 北京:清华大学, 1994.

## Numerical Study on the Process of V-channel Explosive Dispersal for Forming Water Cloud

DING Jue, LIU Jia-cong

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The cloud (such as water cloud), which is formed by the inert substance suspending in the air, can prevent or suppress flame and shock wave's propagation. Using a V-channel, water can be explosively dispersed to form water cloud, to get the aims of prevention or suppression of flame and propagation of shock wave. This paper presents the numerical simulation conducted on this process of explosive dispersion of water and formation of the water cloud. A comparison between the front trajectories of water cloud computed and the experimental data shows that the computed results are in good agreements with the experimented.

**Key words:** explosive dispersal; suppression