

文章编号: 1006-9941(2004)05-0269-04

## 悬浮 RDX 粉尘的爆轰波结构

郑森, 洪滔

(北京应用物理和计算数学研究所, 北京 100088)

**摘要:** 使用两相流模型, 对管中悬浮黑索金(RDX)粉尘混合空气的爆轰过程进行了理论分析。粉尘的爆轰波模型是以两相流模型为基准, 气体和颗粒具有不同的速度及温度。本实验就 RDX 粉尘浓度对点火延迟、爆轰波压力、温度的影响进行了研究, 得到了爆轰波中各物理量分布, 并确定了 RDX 粉尘爆轰的浓度极限。

**关键词:** 爆炸力学; 黑索金(RDX); 爆轰; 两相流

**中图分类号:** O347.5; O38

**文献标识码:** A

### 1 引言

粉尘爆轰是一种常见的爆轰形式。当激波在凝聚态燃料颗粒和气相氧化剂组成的悬浮流中传播时, 波后高温气流加热燃料颗粒, 经一段诱导期后使之点火燃烧。当燃烧释放的热能够支持激波稳定传播, 即形成爆轰。

根据粉尘的燃烧特性可把粉尘分为两大类, 即活性粉尘和非活性粉尘。其根本区别是: 非活性粉尘本身不含氧或含氧量极低, 只有当分散在含氧气体中时才可能发生爆炸, 存在浓度上限; 反之, 活性粉尘自身含氧, 含氧气体的存在与否并非发生粉尘爆轰的必要条件, 不存在浓度上限。RDX 是一种典型的活性粉尘, 近年来, Shauel Eidelman 等人<sup>[1]</sup> 对不同浓度的 RDX 与空气混合物中的爆轰波传播进行了数值模拟, 分析了浓度分布(0.75 ~ 1 000 kg · m<sup>-3</sup>) 对爆轰波传播的影响, 但是没有涉及浓度极限的讨论。本文使用一维的两相流模型, 对悬浮 RDX 粉尘的爆轰波结构进行了分析, 并且对悬浮 RDX 粉尘与空气混合能够产生爆轰的浓度下限进行了计算。

### 2 悬浮 RDX 粉尘的爆轰波结构模型

#### 2.1 物理模型

本实验使用 ZND 模型研究悬浮 RDX 粉尘的爆轰波结构。传统的 ZND 模型认为爆轰波的前峰是一个

无反应的预压冲击波, 冲击波后是一个连续的反应区。化学反应在这个反应区内进行并完成。反应区的初始状态是冲击波后的状态, 压力在预压冲击波后形成一个尖点, 称为 Von Neumann 尖点, 反应区的终态就是反应完成的状态。分析 RDX 粉尘时, 模型中假定: 反应区内的流动被假定为一维定常的, 颗粒是球型的, 在气体中均匀分布。两相分离流处理, 考虑两相之间质量、动量与能量转换。

颗粒相的质量、动量和能量守恒方程如下:

$$\frac{d}{dz}(\sigma_p v_p) = -J \quad (1)$$

$$\frac{d}{dz}(\sigma_p v_p^2) = f - Jv_p \quad (2)$$

$$\frac{d}{dz}(\sigma_p v_p e_p) = q - Je_p \quad (3)$$

在方程中,  $\sigma_p, v_p$  是质量浓度和颗粒速度;  $J, f, q$  各自代表颗粒和气体之间的质量交换, 动量交换和热传导;  $e_p$  是固体颗粒内能。

气相的质量、动量和能量的守恒方程如下:

$$\frac{d}{dz}(\rho_g v_g) = J \quad (4)$$

$$\frac{d}{dz}(p + \rho_g v_g) = (Jv_p - f) \quad (5)$$

$$\frac{d}{dz}[\rho_g v_g (\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho_g} + \frac{v_g^2}{2})] = J(e_p + \frac{v_g^2}{2}) - fv_p - q \quad (6)$$

在方程中,  $\rho_g, v_g$  是气体的浓度和速度;  $T, p, \gamma$  分别是温度, 压力和气体多方指数; 下标 g 代表气体, p 代表颗粒, 0 代表初始状态。

气体的状态方程为:

$$p = \rho_g RT_g \quad (7)$$

收稿日期: 2004-04-08; 修回日期: 2004-06-10

作者简介: 郑森(1977-), 女, 硕士研究生, 从事两相爆轰研究。

粒子和气体的相互作用项如下<sup>[2]</sup>:质量交换:

$$J = \begin{cases} 0, T_p < T_{\text{ign}} \\ 3\sigma_p(1 + 0.276 \sqrt{Re}), T_p \geq T_{\text{ign}} \end{cases} \quad (8)$$

动量交换:

$$f = \frac{3}{4} \frac{\rho_g}{\rho_p} \frac{\sigma_p}{d_p} C_d (v_g - v_p) |v_g - v_p| \quad (9)$$

在这里,  $C_d$  是粒子的施曳力系数,  $d_p$  是颗粒直径。

热传导:

$$q = \frac{6\sigma_p}{d_p} \left[ \frac{\text{Nu}\lambda_g(T_g - T_p)}{d_p} + \varepsilon\sigma_{\text{Boltz}}(T_g^4 - T_p^4) \right] \quad (10)$$

$\text{Nu}$  是 Nusselt 数, 表达式为:  $\text{Nu} = 2 + 0.459\text{Re}^{0.55}\text{Pr}^{0.33}$ ,  $\text{Pr}$  是普朗特数。

$$\frac{dp}{dz} = \frac{J(e_p + \frac{1}{2}v_p^2 + \frac{1}{2}v_g^2 + 2v_g v_p + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} - \frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{p}{\rho} \frac{v_p}{v_g}) - f(v_p + v_g - \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho v_g}) - q}{\frac{\gamma}{\gamma-1}(v_g - \frac{p\gamma}{v_g\rho})} \quad (12)$$

为了考察方程性质, 方程(12)可以写为:

$$\frac{dp}{dz} = K \frac{\dot{q}_+ - \dot{q}_-}{M^2 - 1} \quad (13)$$

其中:  $K = (\gamma - 1)v_g v_c^2$

$\dot{q}_+ =$

$$J(e_p + \frac{1}{2}v_p^2 + \frac{1}{2}v_g^2 + 2v_g v_p + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} - \frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{p}{\rho} \frac{v_p}{v_g})$$

$$\dot{q}_- = f(v_p + v_g - \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho v_g}) + q$$

$$\text{声速 } v_c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}, \text{ 气体马赫数 } M = \frac{v_g}{v_c}.$$

计算使用具有四阶精度的 admas 修正算式, PMECME 模式<sup>[4]</sup>求解两相流体力学微分方程组, 数值模拟两相爆轰进程, 得到爆轰波结构和参数。

### 3 计算结果

#### 3.1 悬浮 RDX 粉尘爆轰波结构:

两相混合物中的 RDX 颗粒密度为  $\sigma_p = 750 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 颗粒直径为  $60 \text{ }\mu\text{m}$ , 管径  $d_w = 0.15 \text{ m}$ 。

图 1(a) 是气体和颗粒的温度分布。在耿俊峰等人对 RDX 的热分解特性研究中<sup>[5]</sup>, 从 DSC 实验谱图可以清楚看到, RDX 受热后出现吸热与放热两个谱峰。RDX 的熔点是  $478 \text{ K}$ <sup>[6]</sup>。当颗粒温度到达熔点以后, RDX 颗粒以液滴形式与压缩空气混合。当温度进

在气体温度和氧浓度保持不变的情况下, 颗粒直径随时间变化的关系式为:

$$t_p = d_{p0}^2 / \beta \quad (11)$$

其中:  $\beta = 8.57 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

#### 2.2 爆速的求解:

这里的问题是求解常微分方程组。爆轰波开始处的数值由前导冲击波条件给出。当  $t = 0$  时,  $x = 0$ , 颗粒未被加热 ( $T_p = T_0$ )。依据非理想爆轰理论, 常微分方程组在 CJ 点处是一个鞍点<sup>[3]</sup>, 在 CJ 点处, 气体马赫数等于 1, 有效放热等于 0。为了这个目的, 压力梯度方程从常微分方程组中推导出来:

一步升高到  $503 \text{ K}$ , 液态 RDX 快速分解。因此, 可以认为 RDX 粉尘的点火温度是  $503 \text{ K}$ <sup>[6]</sup>。当 RDX 的温度到达熔点以前, 气体温度呈下降的趋势。在这个区间内, 化学反应还没有发生, 气体能量通过对流热传导转移到粒子上, 粒子温度升高。RDX 的点火温度为  $503 \text{ K}$ , 在点火以后, 粒子开始燃烧, 气体和颗粒的温度以较快的速率上升。当温度到达  $2000 \text{ K}$  以后, 温度上升的速率变缓。这时, 由于颗粒和气体之间的热传导效应, 二者温度趋于一致。

图 1(b) 是压力分布曲线。从激波阵面到点火面为诱导区。诱导区内因两相流为主导因素, 故压力呈上升趋势。点火后, 反应区内的化学反应效应逐渐成为主导因素, 压力下降。在理想的 ZND 模型中, 激波后即反应区, 颗粒燃烧释放出能量。而在这里, 由于点火延迟时间的存在, 反应要在点火以后才开始。这是与理想的 ZND 模型不同的地方。

通过有效放热和气体马赫数来计算 CJ 爆速, 直径为  $60 \text{ }\mu\text{m}$  的 RDX 颗粒的 CJ 爆速为  $1.58 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 压力最大值为  $4.55 \text{ MPa}$ 。在以往的研究中, 很少有涉及到悬浮 RDX 粉尘爆轰的实验结果。Eidelman<sup>[1]</sup> 等人计算得到浓度为  $0.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  的 RDX 粉尘的爆轰波速度为  $1622 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 压力最大值为  $4.8 \text{ MPa}$ 。这里的计算结果与 Eidelman 的计算结果接近。

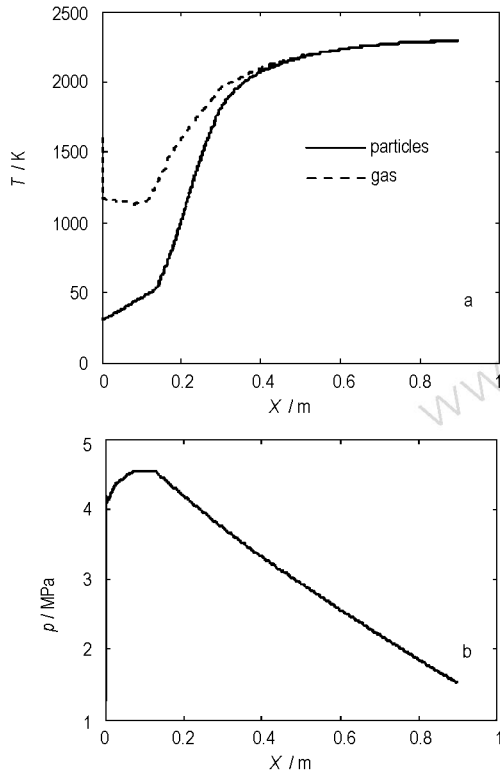


图 1 激波后参数分布  
a—温度分布, b—压力分布  
Fig. 1 Parameter distribution behind shock wave  
a—temperature distribution, b—pressure distribution

### 3.2 不同密度 RDX 粉尘爆轰时的数值模拟结果

图 2 是 RDX 粉尘浓度对  $p_{max}$  的影响。图中结果显示,  $p_{max}$  数值随着粉尘浓度的增加近似呈线性关系。

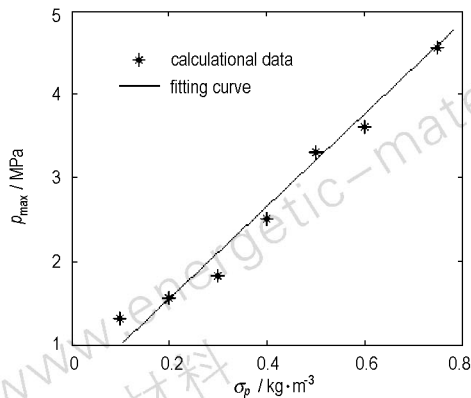


图 2 不同浓度时  $p_{max}$  数值与拟合曲线  
Fig. 2 Calculational data of  $p_{max}$  of RDX power under different concentration and its fitting curve

图 3 是 RDX 粉尘浓度对爆速的影响。当粉尘浓

度小于  $0.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  时,爆速和粉尘浓度基本呈线性关系。当粉尘浓度大于  $0.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  时,爆速随粉尘浓度上升的趋势则变缓。

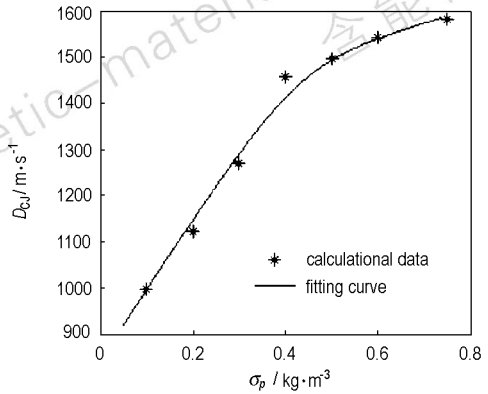


图 3 不同浓度时爆轰波速度与拟合曲线  
Fig. 3 Calculational data of velocity of detonation under different concentration and its fitting curve

图 4 为 RDX 颗粒浓度不同时,气体马赫数的分布。在图中,与  $M=1$  相交的点就是 CJ 点。根据非理想爆轰的理论,CJ 爆轰的条件是:当气体马赫数  $M=1$  时,有效放热为零。当粉尘浓度等于  $0.076 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  时,条件不能满足,因而判断出,当 RDX 粉尘浓度小于  $0.076 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  不能产生自持爆轰。因此认为 RDX 粉尘爆轰浓度的下限是  $0.076 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

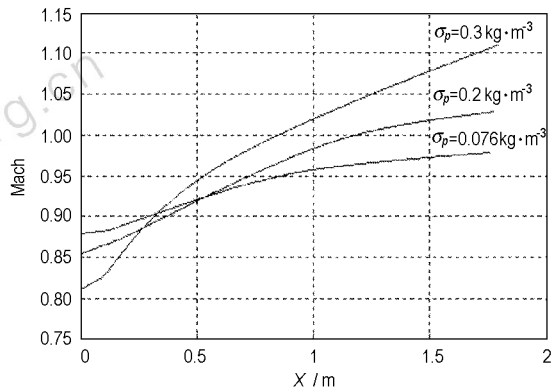


图 4 马赫数的分布  
Fig. 4 Mach number distribution  
(difference of concentration of particles)

### 4 结 论

文章用两相流模型对一维定常状态下的 RDX 粉尘爆轰进行了数值模拟,得到了 RDX 粉尘在空气中爆轰时的物理量的变化,并且对 RDX 颗粒浓度分别为  $0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  的粉尘爆轰

进行了数值模拟。分析得到不同颗粒浓度时,  $p_{\max}$  数值随着粉尘浓度的增加呈现线性关系。确定了 RDX 粉尘爆轰浓度下限为  $0.076 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

#### 参考文献:

- [1] Shmuel Eidelman, YANG Xiao-long. Detonation wave propagation in combustible particle/air mixture with variable particle density distributions [J]. *Combust. Sci. and Tech.*, 89: 201 - 218.
- [2] Veyssiere B, Khasainov B A. A model for steady, plane, DFD in gaseous explosive mixtures with aluminum particles in suspension [J]. *Combustion and Flame*, 1991, 85: 241 - 253.
- [3] Khasainov B A, Veyssiere B. Steady, plane, DFD in gaseous detonation mixtures containing a suspension of aluminum particles [J]. *Prog. Astronaut. Aeronaut.*, 1988, 114: 284 - 298.
- [4] 胡健伟, 汤怀民. 微分方程数值方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.  
HU Jian-wei, TANG Huai-min. Numerical Method of Differential Equation [M]. Beijing: Science Publishing Company, 1999.
- [5] 耿俊峰, 劳允亮. CP, RDX 和  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  热分解及爆轰特征的对比研究 [J]. 含能材料, 1994, 2(4): 20 - 25.  
GENG Jun-feng, LAO Yun-liang. A comparative study on the thermal decomposition and detonation behaviors of CP, RDX and  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  [J]. *Energetic Materials*, 1994, 2(4): 20 - 25.
- [6] 董海山, 周芬芬, 主编. 高能炸药及相关物性能 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.

## Detonation Structure of RDX Dust in Suspension

ZHENG Miao, HONG Tao

(Institute of Applied Physics and Computation Mathematics, CAEP, Beijing 100088, China)

**Abstract:** RDX dust detonation in suspension behind shock waves was analyzed with two-phase flow model. In the two-phase flow model, steady-state detonation regimes were studied on the basis of the mathematical model of detonation of RDX particles taking into account differences in velocities and temperatures of the mixture components. In this paper, pressure of detonation and development of temperature were numerically simulated when concentration of particle changed. Distribution of parameter was obtained and detonation of RDX dust-air in suspension didn't arise if the concentration of particles was less than  $0.076 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

**Key words:** explosion mechanics; RDX dust; detonation; two-phase flow



### 火工与烟火技术未来发展研讨暨《火工品》期刊百期庆祝会在广西桂林召开

由中国兵工学会火工烟火专业委员会、《火工品》编辑委员会主持召开的火工与烟火技术未来发展研讨暨《火工品》期刊百期庆祝会于2004年8月9日至8月11日在广西桂林召开。来自北京理工大学、南京理工大学、中北大学(原华北工学院)、中国兵器工业第213所、204所等17个单位的领导、专家、教授及入选论文作者50余人参加了此次盛会。本次盛会由中国兵工学会火工烟火专业委员会主任委员、《火工品》期刊主编、中国兵器工业第213所所长周胜利主持。会议期间,召开了中兵工学会火工烟火专业六届委员会会议及《火工品》期刊第四届编委会换届工作会议,开展了火工与烟火技术未来发展研讨与学术交流及《火工品》期刊百期庆祝活动。学术交流以大会主报告和分场报告的形式展开,与会专家、教授及入选论文作者分别从火工烟火药剂研究、测试与工艺、安全性与可靠性等多个方面进行了交流。特别是由北京理工大学机电工程学院常务副院长焦清介教授所作的《火工烟火基础研究》将本次学术交流会推向了高潮,该报告对火工烟火技术的概念进行了创新,为今后火工品发展提供了借鉴。

(中国工程物理研究院化工材料研究所 周美林供稿)