

气体-燃料液滴两相系统爆轰的数值模拟^①

洪 滔 秦承森

(北京应用物理与计算数学研究所 北京 100088)

摘要 用两相流体力学模型对气体-燃料液滴系统进行了研究。数值模拟了点火后两相系统爆轰波的发展过程,得到爆轰波的结构和参数。数值模拟结果表明气体-燃料液滴系统爆轰波有较宽的反应区,因而两相爆轰波的曲率对爆速的影响效应十分明显。进行了燃料液滴尺寸对爆轰波的结构和参数的影响的数值模拟。除了很小的液滴外,燃料液滴在爆轰波前导激波面和 CJ 面间不能完全气化。随着液滴尺寸的增加,燃料液滴在爆轰波前导激波面和 CJ 面间释放出的能量随之减少,爆轰参数也随之下降。

关键词 气体-液滴系统 两相流 爆轰

中图法分类号 O381

1 引 言

燃料液滴散布在空气或氧气中,形成气体与燃料液滴的混合介质。对在这种介质中产生的爆轰的研究自 60 年代以来越来越受到重视。因为由于人为或偶然因素形成的气体-燃料液滴系统经点火后形成爆轰,对生命财产造成严重破坏。因此研究气体-燃料液滴两相系统的爆轰有着十分重要的意义。

早期对云雾爆轰的研究较多通过实验进行^[1~3],理论研究则是简单地对其中某一部分进行研究^[2,4]。随着计算流体力学的发展,两相流体力学方法被逐渐应用于气体-燃料液滴两相系统爆轰的研究,数值模拟成为一种重要手段。曾经提出的一些关于气体-燃料液滴系统爆轰的两相流模型^[5,6],考虑了气液两相之间的一些相互作用,比如考虑了液滴在气流作用下的运动、剥离,液滴的蒸发。这些模型对能量释放都使用了简化模型,气相也为等效单一气体。我们从两相流体力学方程出发,在物理模型中考虑了反应物与产物的组分,使用一步化学反应速率的放能过程,以及气体对液滴的减速和剥离作用,气体与液滴的对流热传导和液滴的蒸发相变过程,对气体和燃料液滴的两相爆轰过程进行了理论研究。

2 物理模型和方程

气体-燃料液滴系统中爆轰的点火和增长过程是含化学反应的非均匀多相流体力学过程,它是一系列复杂过程的组合:包括相变、混合、化学反应等。当点火炸药爆炸产生的激波进入气体-液滴混合区时,液滴在激波后的气流作用下产生加速、变形、破碎、剥离、蒸发,燃料蒸气与氧发生化学反应,释放出能量,反应区的能量输送到先行激波,如果释放的能量能够补偿激

^① 中国工程物理研究院基金资助(编号 990104)。

洪滔:男,1963年3月生,副研究员。

1998-12-23 收到原稿,1999-04-28 收到修改稿。

波前进消耗的能量,将形成自持爆轰。人们通常关心点火后形成的爆轰波的结构和参数等情况。我们用两相流体力学模型通过数值模拟解决这些问题。

两相介质由氧气或空气和燃料液滴组成。两相有各自的状态变量如密度、速度、内能。每一相都服从守恒定律,但两相间存在质量、动量、能量交换。

在本文中我们假定:流场是一维非定常的;处于同一时空位置的气相混合物中的各种气体具有同一温度;液滴分布于气体中,作为连续介质处理。它们的初始直径相同,且在剥离、蒸发过程中保持球形;液滴内温度是均匀分布的;液滴的总体积与混合物的体积相比可以忽略;液滴间的相互作用可以忽略,液滴通过激波不破碎并保持球形,在激波后的气流作用下仅发生剥离;液滴剥离后成为气体,与其他气体瞬间均匀混合;燃料为碳氢化合物,与氧反应生成的产物为二氧化碳和水;化学反应释放的能量仅被气体吸收。

描述气体和液滴的运动方程如下。

气相的守恒方程:

$$\text{质量守恒} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_1 \rho_1) + \frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial}{\partial r}(r^\alpha \alpha_1 \rho_1 u_1) = I_d \quad (1)$$

$$\text{动量守恒} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_1 \rho_1 u_1) + \frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial}{\partial r}(r^\alpha \alpha_1 \rho_1 u_1^2) = -\alpha_1 \frac{\partial p}{\partial r} - F_d + I_d u_2 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{能量守恒} \quad & \frac{\partial}{\partial t} \left[\alpha_1 \rho_1 (e_1 + 0.5 u_1^2) \right] + \frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial}{\partial r} \left[\alpha_1 \rho_1 u_1 (e_1 + 0.5 u_1^2 + \frac{p}{\rho_1}) \right] = \\ & -Q_d + Q_c - F_d u_2 + I_d \left[e_2 + \frac{p}{\rho_2} + 0.5 u_2^2 \right] \end{aligned} \quad (3)$$

液相的守恒方程:

$$\text{质量守恒} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_2 \rho_2) + \frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial}{\partial r}(r^\alpha \alpha_2 \rho_2 u_2) = -I_d \quad (4)$$

$$\text{动量守恒} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_2 \rho_2 u_2) + \frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial}{\partial r}(r^\alpha \alpha_2 \rho_2 u_2^2) = -\alpha_2 \frac{\partial p}{\partial r} + F_d - I_d u_2 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{能量守恒} \quad & \frac{\partial}{\partial t} \left[\alpha_2 \rho_2 (e_2 + 0.5 u_2^2) \right] + \frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial}{\partial r} \left[\alpha_2 \rho_2 u_2 (e_2 + 0.5 u_2^2 + \frac{p}{\rho_2}) \right] = \\ & Q_d + F_d u_2 - I_d \left[e_2 + \frac{p}{\rho_2} + 0.5 u_2^2 \right] \end{aligned} \quad (6)$$

上面各式中: $\alpha=0,1,2$ 分别表示平面、柱面、球面坐标。其中下标1、2分别为气相和液相; ρ 为密度; u 为速度; p 为压力; e 为内能; α_1, α_2 为气相和液相的体积百分比,满足 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$; I_d 是由于液滴蒸发和剥离引起单位体积液滴的质量变化率; F_d 是气体作用于单位体积的混合物中的液滴上的力; Q_c 是单位体积化学反应释放出的能量; Q_d 是单位体积两相间的热交换。

气相由化学反应气体组成,每一种气体成分的浓度为 Y_j ($j=1, 2, \dots, N$),其中 $j=1$ 对应于燃料, $j=2$ 对应于氧化物, $j=3$ 为氮气, $j=4$ 为二氧化碳, $j=5$ 为水蒸汽。各种气体相应的分子量为 W_j 。化学反应为 $\sum_j a_j x_j = \sum_j b_j x_j$,化学反应当量系数 a_j, b_j 满足 $\sum_j (a_j - b_j) W_j = 0$ 。

组分的质量变化方程如下

$$\frac{\partial(\rho_1 \alpha_1 Y_j)}{\partial t} + \frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial}{\partial r}(r^\alpha \rho_1 \alpha_1 Y_j u_1) = \dot{\rho}_j^c + I_d \dot{\rho}_j \quad (7)$$

$$\dot{\rho}_j^c = W_j (b_j - a_j) \dot{\omega} \quad (8)$$

$$Q_c = \sum_j (a_j - b_j) (\Delta h_f^0)_j \quad (9)$$

Δh_f^0 表示各组分绝对零度时的生成焓。在本文中燃料用庚烷, 用 Westbrook^[7] 的一步反应描述化学反应过程, 反应率为

$$\dot{\omega} = A [\text{Fuel}]^a [\text{O}_2]^b e^{-E/RT_1} \quad (10)$$

式中: A 、 a 和 b 是常数, E 为活化能。气体的状态方程为理想气体状态方程

$$p = \rho_1 RT_1 \sum_{j=1}^N \frac{Y_j}{W_j} \quad (11)$$

液滴的剥离和蒸发

$$I_d = -n \rho_2 4\pi r^2 \frac{dr}{dt} \quad (12)$$

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{1}{2} \sqrt{3\pi} \left[\frac{\rho_1 \mu_1}{\rho_2 \mu_2} \right]^{\frac{1}{6}} \left[\frac{\mu_2}{\rho_2} \right]^{\frac{1}{2}} (u_1 - u_2)^{\frac{1}{2}} r^{-\frac{1}{2}} - \frac{3\lambda_1 Nu (T_1 - T_2)}{\pi r \rho_2 L} \quad (13)$$

第一项是剥离^[8], 第二项是蒸发^[6]。 r 是液滴半径; μ 是动力粘性系数; L 是蒸发热; λ_1 是气体的热传导系数; n 为单位体积中液滴颗粒数; Nu 为 Nusselt 数。

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

由于剥离效应, 液滴周围被燃料蒸气包围, 假定液滴温度低于沸点时周围气体中燃料蒸汽分压大于燃料蒸汽压, 因此可以忽略蒸发效应, 即不考虑第二项。只有当液滴温度达到沸点时, 才考虑蒸发。

单位体积中气体对液滴的作用力^[6]

$$F_d = n f_d \quad (15)$$

$$f_d = \frac{1}{2} \pi r^2 C_D \rho_1 |u_1 - u_2| (u_1 - u_2) \quad (16)$$

$$C_D = \begin{cases} 27 Re^{-0.84}, & Re < 80 \\ 0.27 Re^{0.21}, & 80 \leq Re < 10^4 \\ 2, & Re \geq 10^4 \end{cases} \quad (17)$$

两相间的对流热传导^[9]

$$Q_d = 2\pi r \lambda_1 Nu (T_1 - T_2) n \quad (18)$$

在两相系统爆轰中既有剥离和蒸发的物理过程, 又有化学反应过程。我们需要对这两种过程的特征时间进行估计。如果气体密度为 2kg/m^3 , 液滴半径为 $50\mu\text{m}$, $(u_1 - u_2) \sim 10^3\text{m/s}$, $(T_1 - T_2) \approx 2200\text{K}$, 由(14)式得到 $dr/dt \approx 1.2\text{m/s}$ 。那么剥离和蒸发的特征时间约为 $5 \times 10^{-5} / 1.2 \approx 4 \times 10^{-5}\text{s}$, 即 $40\mu\text{s}$ 。如果燃料气体的浓度为 1% , 氧的浓度为 20% , 气体温度为 2500K , 由(11)式得到化学反应速率约为 $10^5\text{kg/m}^3\text{s}$, 因此反应的特征时间约为 $2 \times 0.01 / 10^5 = 2 \times 10^{-7}\text{s}$, 即 $0.2\mu\text{s}$ 。由此可见燃料液滴的剥离和蒸发的特征时间比化学反应的特征时间长得多, 因此在两相系统爆轰中剥离和蒸发过程决定了能量的释放速率。用具有二阶精度的 MacComak 差分格式加上 FCT 技术求解以上方程组^[10~12], 编制了求解两相系统中爆轰波发展的程序。

3 数值模拟结果

3.1 初始条件

两相系统中气体为氧气和空气, 液体燃料为庚烷 C_7H_{16} , 庚烷的密度为 675kg/m^3 , 蒸发热为

360kJ/kg。初始气体参数： $p=0.1013\text{MPa}$ ，氧气密度为 1.31kg/m^3 ，空气密度为 1.18kg/m^3 ，温度为 298K 。燃料与系统中氧气的当量比均为 $\Phi=1$ 。我们求解球对称情况下两相系统爆轰点火与增长问题。两相系统的半径为 2m ，在中心处点火。点火能量为 2.3MJ 。本文中用点爆解析解^[13]得到炸药产物飞散到 10cm 处的解作为初始条件对两相系统进行点火。

3.2 氧气-燃料液滴系统中的爆轰波

3.2.1 两相爆轰波的曲率对爆速影响的效应

图 1 是燃料液滴半径为 $100\mu\text{m}$ ，气体为氧气的两相系统中气相压力和密度随空间坐标的分布图，时间从 $100\mu\text{s}$ 到 $900\mu\text{s}$ ，每条曲线间隔 $100\mu\text{s}$ 。从图中可以看出，每条曲线间隔逐渐加大，这说明爆轰波速度在增加，各物理量除 $100\mu\text{s}$ 时受初始条件影响较大外，其余时刻气相的压力和密度呈增加的趋势。这种结果与爆轰波速度受爆轰波曲率影响的研究结果一致^[14]：爆速与爆轰波的曲率有关，曲率越大，爆速越低；爆轰波宽度越宽，爆速受曲率影响越大。两相系统中的爆轰波由前导激波和激波后的化学反应区组成。由于燃料液滴的剥离和蒸发的特征时间比较长，决定了反应区中能量的速率，因此爆轰波反应区较宽。通过数值模拟可以确定爆轰波 CJ 面满足 $u_1+c_1=D$ 的位置， c_1 为气体声速。如果以激波面到 CJ 面的距离为爆轰波宽度，那么 $t=900\mu\text{s}$ 时爆轰波的宽度为 6.5cm 。气体-燃料液滴系统中爆轰波宽度较宽，因此爆速受曲率影响的效果十分明显。当爆轰波半径较小时，曲率较大，爆速较小，因而爆轰波参数较低。当爆轰波半径较大时，曲率较小，爆速变大，因而爆轰波参数升高。

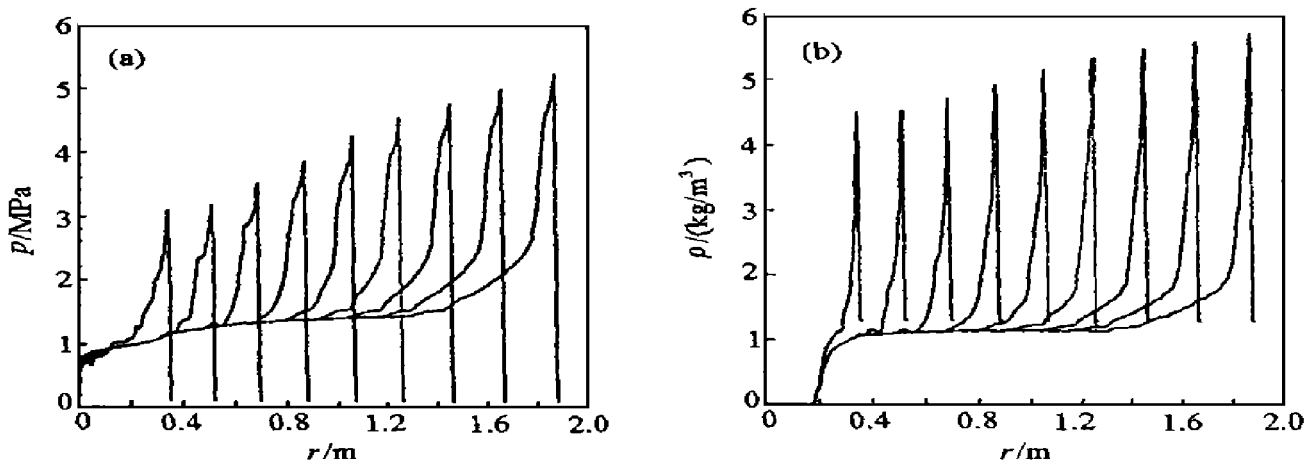


图 1 燃料液滴半径为 $100\mu\text{m}$ ，气体为氧气的两相系统中的气相压力、密度随空间坐标的分布图

Fig.1 The pressure and density of gas phase vs coordinate r as the droplet radius is $100\mu\text{m}$ in oxygen

3.2.2 两相爆轰波的起爆增长过程

图 2 是爆速随激波阵面的变化。当爆炸产生的激波进入两相系统时，激波先是衰减。随着液滴在激波作用下发生剥离破碎，气化并与氧气发生化学反应释放出能量，如果释放出的能量能够维持激波传播所需的能量，就形成了爆轰波。图 2 显示在达到极小值后爆速开始增加。数值模拟结果表明形成爆轰波后，爆轰波宽度不变。由于爆轰波宽度较宽，产生明显的曲率效应，所以爆速随着爆轰波半径增加而增加。

在 CJ 面后液滴仍未完全剥离和蒸发，尽管这些液滴还会被剥离和蒸发并与氧气反应释放出能量，但这些能量不能输送给爆轰波。定义燃料液滴蒸发率 $\eta=1-m/m_0$ ，其中 m 表示 CJ 面上的燃料液滴的质量， m_0 为燃料液滴的初始质量。实际上燃料的蒸发率是燃料液滴在爆轰

波激波面和 CJ 面间被剥离、气化并与氧化学反应释放能量的衡量。

以激波面通过离爆心距离分别为 1.75m 和 1.875m 的两个点的平均速度为爆速, 得到爆速为 2079m/s。爆轰波的前导激波通过 1.875m 处的激波密度、压力、气体速度分别为 5.705kg/m³、5.162MPa、1600m/s, 而 CJ 面气体的密度、压力、速度分别为 2.275kg/m³、3.295MPa、813m/s。激波面的参数远大于 CJ 面上的参数。燃料的蒸发率 0.90。

如果点火能量不够大, 激波衰减后不能再增长, 则不能形成爆轰。所以存在使得爆轰波能够形成的临界点火能量。

3.2.3 液滴半径对爆轰参数的影响

表 1 列出了不同液滴半径的两相系统中气相为氧气时爆轰波前导激波位于 1.875m 处时的爆轰波参数, 其中 r 为液滴半径, D 为爆轰波速度, p 、 ρ 、 u 分别为压力、密度、气体速度, 下标 sh 表示激波面的参数, 以下标 CJ 表示 CJ 面的参数, L 表示爆轰波宽度, η 为液滴蒸发率。

表 1 氧气中两相爆轰的参数

Table 1 Detonation parameters in oxygen

$r/$ μm	$D/$ (m/s)	$p_{\text{sh}}/$ MPa	$\rho_{\text{sh}}/$ (kg/m ³)	$u_{\text{sh}}/$ (m/s)	$p_{\text{CJ}}/$ MPa	$\rho_{\text{CJ}}/$ (kg/m ³)	$u_{\text{CJ}}/$ (m/s)	η	$L/$ cm
25	2430	7.201	4.39	1640	4.67	3.06	1120	1.000	1.0
50	2320	6.66	5.27	1740	4.21	2.83	1030	0.983	2.3
100	2080	5.16	5.71	1600	3.30	2.28	810	0.900	6.5
150	1860	4.01	5.67	1430	2.60	1.85	620	0.833	15.5
200	1710	3.36	5.68	1320	2.10	1.68	540	0.560	16.2
250	1600	2.92	5.70	1240	1.82	2.58	480	0.458	18.7
300	1450	2.53	5.41	1160	1.53	1.49	420	0.353	18.8
350	1420	2.29	5.58	1120	1.33	1.29	330	0.361	22.5

显然液滴颗粒越大, 剥离和蒸发的速度越慢, 使得反应区变宽, 爆轰波速度和压力降低。从表中数据可以看出不论是前导激波面还是 CJ 面压力、速度、温度都随着燃料液滴的半径增加而下降, 燃料蒸发率也随之下降。爆轰波宽度随液滴半径增大而变宽, 但液滴较大时增加不明显。

3.3 空气-燃料液滴系统中的爆轰波

3.3.1 与纯氧中爆轰波的比较

图 3 是燃料液滴半径为 50 μm , 气体为空气的两相系统中气相压力、速度、密度的分布图。表 2 列出液滴半径同为 50 μm , 气体为氧气和空气时爆轰波在 1.875m 的参数。由于二者燃料与氧气的当量比均为 1, 而空气含氧量较低, 燃料粒子数较少, 因而激波参数比气体为氧气的两相系统中的参数低。燃料液滴半径为 50 μm , 气体为空气时, 1.75m 和 1.875m 两点间平均

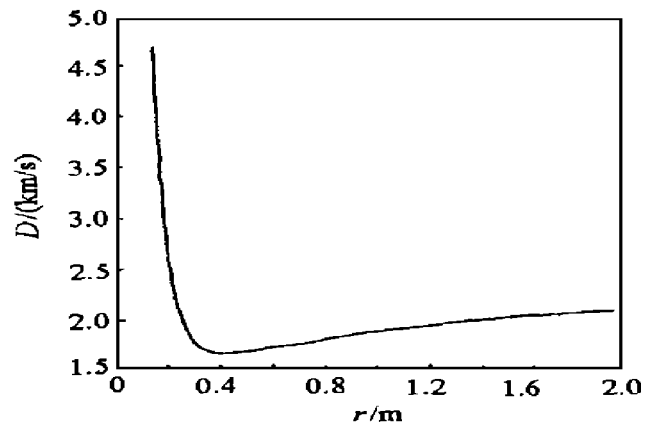


图 2 燃料液滴半径为 100 μm , 气体为氧气的两相系统中的爆速随激波阵面的变化

Fig.2 Velocity of detonation vs its radius as the droplet radius is 100 μm in oxygen

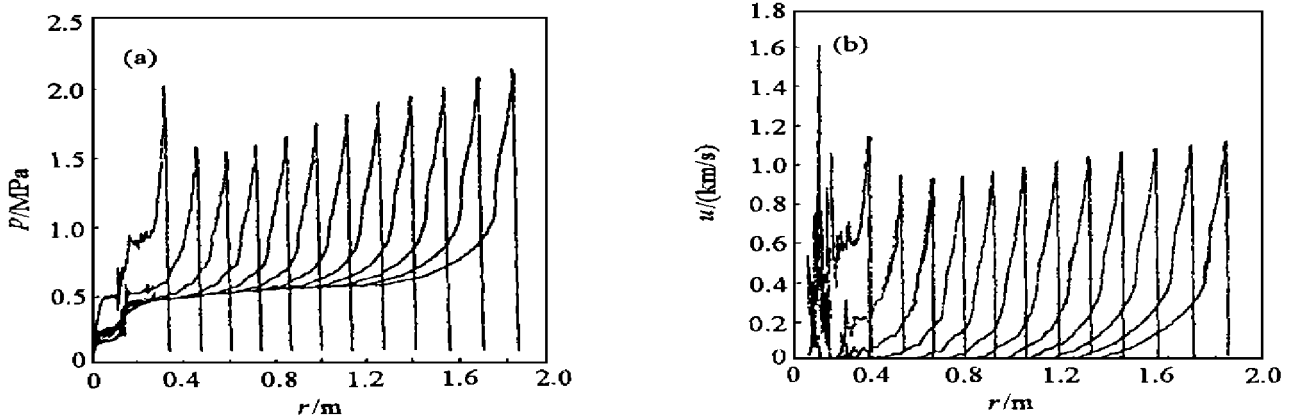


图 3 燃料液滴半径为 $50\mu\text{m}$, 气体为空气的两相系统中的气相压力和密度的分布图

Fig.3 The pressure and density of gas phase vs coordinate r as the droplet radius is $50\mu\text{m}$ in air

爆速为 1671m/s , 1.875m 处激波密度、压力、速度分别为 4.246kg/m^3 、 2.656MPa 、 1291m/s 。爆轰波的宽度为 3.5cm , 比氧气中的爆轰波的宽度宽, 燃料液滴蒸发率为 0.982 , 与纯氧中燃料液滴蒸发率基本相同。CJ 面气体的密度、压力、速度分别为 1.978kg/m^3 、 1.578MPa 、 676m/s 。图 4 是燃料液滴半径为 $50\mu\text{m}$, 气体为空气的两相系统中爆速随激波面的变化。图 5 是 $t=1200\mu\text{s}$ 时爆轰波面附近气相中 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 H_2O 的浓度分布, 图中未画出燃料浓度, 是因为在激波面后化学反应速率远远大于燃料液滴剥离和蒸发的速率, 所以气相中燃料浓度始终较低, 这里的数值模拟表明气相中燃料浓度低于 0.3% 。图 6 是气体的 γ 值分布。

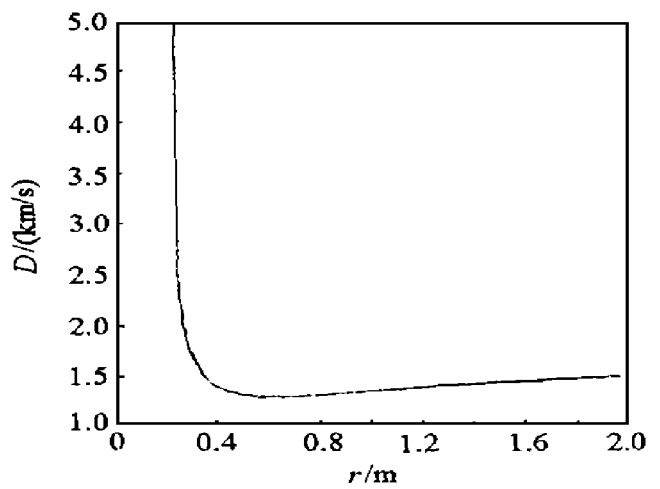


图 4 燃料液滴半径为 $50\mu\text{m}$, 气体为空气时的两相系统中爆速随激波面的变化

Fig.4 Velocity of detonation vs its radius as the droplet radius is $50\mu\text{m}$ in air

表 2 空气和氧气中液滴半径为 $50\mu\text{m}$ 的两相爆轰参数

Table 2 Detonation parameters in air and oxygen as the droplet radius is $50\mu\text{m}$

$r/$ μm	$D/$ (m/s)	$p_{sh}/$ MPa	$\rho_{sh}/$ (kg/m^3)	$u_{sh}/$ (m/s)	$p_{CJ}/$ MPa	$\rho_{CJ}/$ (kg/m^3)	$u_{CJ}/$ (m/s)	η	$L/$ cm
50	2320	6.66	5.27	1740	4.21	2.83	1030	0.983	2.3
50	1670	2.66	4.25	1290	1.58	1.98	680	0.982	3.5

3.3.2 爆轰波参数

表 3 列出不同液滴半径的两相系统中气相为空气时爆轰波前导激波在 1.875m 处时的爆轰波参数。液滴半径为 $25\mu\text{m}$ 时, 燃料的蒸发率为 1 , 爆轰波宽度较窄, CJ 面的参数与气体爆轰波的 CJ 参数十分接近。做为比较, 这里列出庚烷气体与空气混合的爆轰波^[15] 在 CJ 面上气体的密度、压力、速度分别为 2.264kg/m^3 、 1.914MPa 、 805.4m/s , 爆速为 1800m/s , 表 3 中液滴半径为 $25\mu\text{m}$ 时 CJ 面的参数与之十分接近, 所以计算结果是合理的。从表 3 中可以看出, 爆速随液

滴变大而减小。

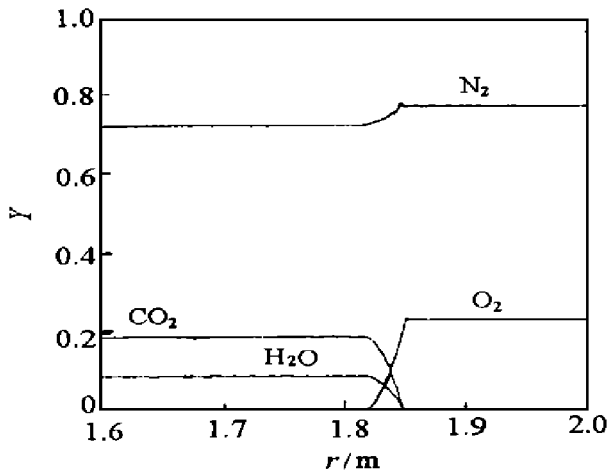


图5 气体质量浓度分布曲线

Fig.5 Profile of mass concentration of gas

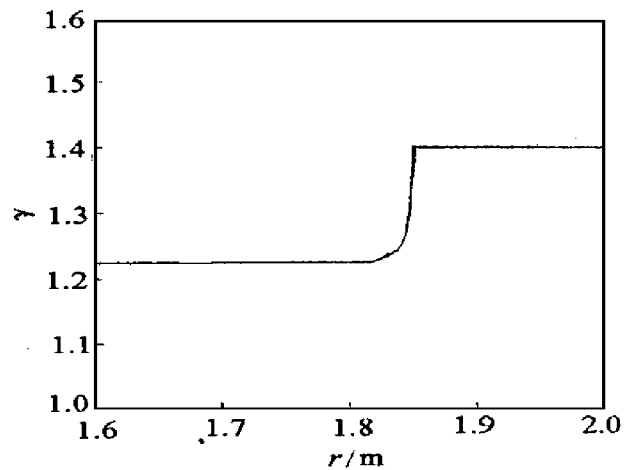


图6 气体 γ 值的分布曲线

Fig.6 Profile of γ value of gas

表3 空气中两相爆轰的参数

Table 2 Detonation parameters in air

$r/$ t/m	$D/$ (m/s)	$p_{sh}/$ MPa	$\rho_{sh}/$ (kg/m^3)	$u_{sh}/$ (m/s)	$p_{CJ}/$ MPa	$\rho_{CJ}/$ (kg/m^3)	$u_{CJ}/$ (m/s)	η	$L_{CJ}/$ cm
25	1740	2.70	3.43	1130	1.80	2.24	750	1.000	1.3
50	1670	2.66	4.25	1290	1.59	1.98	680	0.982	3.5
75	1560	2.42	4.59	1170	1.42	1.83	600	0.939	5.7

4 结 论

从两相流体力学方程出发,编制了描述云雾爆轰的程序,通过数值模拟,研究了两相系统中爆轰的点火和发展过程。两相系统中爆轰波具有复杂的结构,从前导激波面到CJ面具有较宽的反应区,所以两相爆轰波的曲率对爆速影响的效应十分明显。就燃料液滴对爆轰参数的影响进行了数值模拟。除了很小的液滴外,燃料液滴在前导激波面和CJ面间不能完全气化并与其氧化反应,释放出能量支持爆轰波的发展。随着液滴尺寸的增加,蒸发率变小,释放出的能量随之减少,爆轰参数也随之下落。

参 考 文 献

- 1 Nicholls J A, Sichel M, Fry R, et al. Theoretical and Experimental Study of Cylindrical Shock and Heterogeneous Detonation Waves. *Acta Astronautica*, 1974, 1: 385 ~ 404
- 2 Gabrijel Z, Nicholls J A. Cylindrical Heterogeneous Detonation Waves. *Acta Astronautica*, 1978, 5: 1051 ~ 1061
- 3 Bar-Or R, Sichel M, Nicholls J A. The Reaction Zone Structure of Cylindrical Detonations in Monodisperse Sprays. 19th Intern Symp on Combustion. 1982. 665 ~ 673
- 4 Darbora E K. A Model for Spray Detonation. *Acta Astronautica*, 1979, 6: 269 ~ 280
- 5 Mitrofanov V V, Pinaev A V, Zhdan S A. Calculation of Detonation in Gas-Droplet Systems. *Acta Astronautica*, 1979, 6: 281 ~ 296

- 6 Eidelmann S, Burca A. Evolution of a Detonation Wave in a Cloud of Fuel Droplets: Part I. Influence of Igniting Explosion. *AIAA Journal*, 1980, 18 (9): 1103 ~ 1109
- 7 Westbrook C K, Dryer F L. Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon. *AIAA Journal*, 1981, 27: 31 ~ 43
- 8 Ranger A A, Nicholls J A. Aerodynamic Shattering of liquid Drops. *AIAA Journal*, 1969: 286 ~ 290
- 9 周力行. 湍流气粒两相流体和燃烧的理论及数值模拟. 北京: 科学出版社, 1994. 77
- 10 Book D L, Boris J P, Hain K. Flux-Corrected Transport II: Generalization of the Method. *J Computational Physics*, 1975, 18: 248 ~ 283
- 11 Boris J P, Book D L. Flux-Corrected Transport III: Minimal Error FCT Algorithms. *J Computational Physics*, 1976, 20: 397 ~ 431
- 12 Taki S, Fujiwara T. Numerical Simulation of Triple Shock Behavior of Gaseous Detonation. 18th Intern Symp on Combustion. 1981. 1671 ~ 1681
- 13 谢多夫. 力学中的相似方法与量纲理论 (中译本). 北京: 科学出版社, 1982. 235 ~ 267
- 14 孙锦山, 朱建士. 理论爆轰物理. 北京: 国防工业出版社, 1995. 172 ~ 176
- 15 Sedgwick R T, Kratz H R. Fuel Air Explosives: A Parametric Investigation. AD-A159 177

NUMERICAL MODELING OF DETONATION IN GAS-FUEL DROPLETS SYSTEM

Hong Tao, Qing Chengsen

(Institute of Computational Physics and Applied Mathematics, Beijing, 100088)

ABSTRACT The detonation in oxygen-fuel droplet system is numerically studied by using a two-phase fluid model. The development process of detonation in such two-phase system after ignition is modeled. The velocity of detonation is strongly influenced by its curvature because the two-phase detonation has a wide reactive zone between the leading shock wave and CJ surface. The effect of droplet size on the parameters of detonation is also numerically modeled. Besides the smaller droplet, fuel droplet can not be atomized and evaporated completely between the leading shock wave and CJ surface. With the increase of fuel droplet size, the energy sustaining the detonation wave decreases and the parameters of detonation also decrease. The parameters in the leading shock wave and CJ surface are determined by numerical modeling. The gas phase parameters in the leading shock wave are much higher than that of in CJ surface.

KEY WORDS gas-fuel droplets system, two-phase flow, detonation