

镁颗粒群非稳态着火过程数值模拟*

杨晋朝[†] 夏智勋 胡建新

(国防科技大学航天与材料工程学院, 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 长沙 410073)

(2012年3月3日收到; 2012年4月26日收到修改稿)

建立了镁颗粒群着火的一维非稳态有限影响体模型, 数值模拟颗粒群中镁颗粒的着火过程. 研究表明, 当镁颗粒表面反应加剧之后, 颗粒相温度急剧上升, 迅速达到着火, 而其周围气相的温升速率却远小于颗粒的温升速率; 在着火过程中气相温度只在颗粒表面附近升高比较明显, 整体温度升高不大. 分析了颗粒群内部参数和环境参数对镁颗粒群着火的影响. 随颗粒浓度的增加, 颗粒群变得易于着火, 其着火时间变短, 但颗粒浓度增大到一定程度后, 继续增大该值将对颗粒群的着火起消极作用. 环境压力对颗粒群着火的影响比较小, 在 1—5 atm 范围内颗粒群的着火性能基本不变. 气相中氧气浓度对颗粒群的着火性能影响也不显著, 但当氧气浓度过小时, 对着火过程的影响将大大增强. 颗粒粒径、气相/颗粒相初温、辐射源温度对颗粒群着火的影响巨大, 小粒径、高温促使颗粒群快速着火. 数值模拟与文献中试验结果的变化趋势相一致.

关键词: 粉末燃料冲压发动机, 镁颗粒着火, 颗粒群

PACS: 47.70.-n, 47.40.pq, 82.60.cx

1 引言

粉末燃料冲压发动机是一种新概念发动机, 它使用高能量的金属粉末作为燃料, 粉末燃料在流化气的作用下以两相流的形式进入预燃室内, 直接与冲压空气燃烧反应^[1]. 其与传统的固体火箭冲压发动机燃烧特性有所不同, 气固两相流以一定的速度喷入预燃室, 不但在粉末燃料供应系统出口很大区域内形成大浓度的颗粒群, 而且在整个预燃室内颗粒浓度都较大, 所以粉末燃料冲压发动机预燃室内的燃烧类似于粉尘云的燃烧.

大量的研究表明, 群颗粒燃烧与单粒燃烧相比会出现燃点下降、着火延迟期变短等现象, 称为“合作效应^[2] (cooperative effect)” (煤粉燃烧中称为“浓度效应”)^[3]. 普遍认为颗粒群的燃烧是一个复杂过程, 因为颗粒群中各个颗粒会发生相互干扰, 相邻颗粒同时燃烧将有热量交换, 将减少每个燃烧颗粒的热量损失, 促进了颗粒的燃烧; 但同时, 它们互相又争夺氧化性气体, 妨碍了氧化性气体向它们

的火焰阵面扩散, 减缓了颗粒群的燃烧. 颗粒间的相互影响包括很多方面: 改变流场和着火行为、因颗粒浓度变化而延长或缩短着火时间、对热量和氧量的竞争、改变颗粒周围的气体分布、使颗粒周围的流场和燃烧畸变等. 因此颗粒群燃烧不是单个颗粒燃烧的简单叠加, 但目前对颗粒之间相互作用还了解得很不清楚.

国外一些学者^[4]通过对少数几个颗粒在特殊几何分布条件下的燃烧研究发现, 颗粒间距对颗粒燃烧过程中相互作用的影响巨大. Nagata 等^[5]通过实验研究发现颗粒间距对颗粒的火焰形状及火焰的运动影响很大, 并且随着颗粒间距的增大, 颗粒燃烧时间逐渐减小, 火焰距离也减小. 他使用半径为 1.25 mm 的球形颗粒燃料在颗粒距离为 4, 14, 20, 30 mm 等不同的情况下进行燃烧, 发现在大间距的情况下, 颗粒首先出现个体火焰, 随后各颗粒的火焰相交叠加, 形成总体的外部燃烧; 而在小间距的情况下从一开始就表现为外部群燃烧. Brzustowski 等^[6]通过理论与实验研究发现, 颗粒的燃烧速率随颗粒间距的变小而减小, 当颗粒接触时, 其

* 国家自然科学基金 (批准号: 51006118) 资助的课题.

[†] E-mail: yjzhenan@hotmail.com

燃烧速率最小, 并理论计算了两颗粒在粒径不同及间距不同的情况下火焰畸变的形状, 并通过失重条件下的实验验证了其理论.

前人对颗粒群的研究多集中在煤粉、液雾燃料、易挥发的固体燃料等^[7,8], 对金属颗粒群的研究较少. 基于粉末燃料冲压发动机使用镁金属颗粒作为燃料并且在预燃室和燃烧室内颗粒浓度较大的现状, 有必要对镁颗粒群的着火和燃烧机理进行研究. 又因为颗粒在发动机内停留的时间极短, 如何尽快使颗粒实现着火从而使其燃烧完全是提高发动机燃烧效率的关键, 所以粉末燃料的点火技术是粉末燃料冲压发动机的关键技术之一. 本文将基于有限影响体模型对镁金属颗粒群的着火过程进行研究.

2 模型的基本思想与假设

粉末燃料气固两相流喷入预燃室后, 在气相湍流作用下迅速弥散开来, 颗粒在较大范围内均匀弥散. 本模型所研究的是由单一半径 r_p 的镁颗粒均匀弥散在预燃室中形成的颗粒群处在温度为 T_B 的黑体辐射包围之中, 辐射加热使颗粒升温、熔化、着火燃烧. 单颗粒与颗粒群着火的区别在于单颗粒处于无限空间内, 而颗粒群中每个颗粒所拥有的气相资源都有限, 为反映着火机理并反映颗粒浓度对着火的影响, 引入了有限影响体的概念, 镁颗粒群体的着火通过考察这个有限影响体的着火来分析. 如图 1 所示, 有限影响体是指单颗粒及其周围有限空间内的空气组成的球体, 而有限影响体内的空气量为总空气量除以总颗粒数得到. 颗粒浓度 μ (颗粒浓度定义为单位质量空气中的镁颗粒质量) 和颗粒初始半径 r_{p0} 不同时, 这个有限影响体大小也不同 ($R_L = r_{p0}(1 + \rho_p/\mu\rho_g)^{1/3}$, 其中 R_L 为有限影响体的半径, ρ_p 为颗粒密度, ρ_g 为气体密度, μ 为颗粒浓度).

在有限影响体内存在着质量分布、温度分布、浓度分布等, 但由于颗粒均匀弥散, 颗粒没有特殊性, 每个颗粒所处的条件都相同, 每个有限影响体性质也相同, 颗粒只影响自己影响体内的气相, 而不影响其他的影响体.

本模型的主要假设归纳如下:

- 1) 有限影响体内存在非稳态传热和传质;
- 2) 影响体与外界的换热只有辐射换热;

3) 颗粒与气相之间无相对运动, 除化学反应引起的 Stephan 流外, 无其他流动;

4) 影响体的界面类似固体壁面, 传热传质到此为 0;

5) 气相不参与辐射换热, 颗粒为灰体, 各颗粒性质相同, 颗粒之间的辐射换热相互抵消;

6) 镁只与空气中的氧气发生反应, 颗粒着火阶段化学反应为缩核模型, 镁与氧气的表面反应按下式进行: $2\text{Mg}(\text{固}) + \text{O}_2(\text{气}) \rightarrow 2\text{MgO}(\text{固})$, 为一步反应; 反应速率由 Arrhenius 公式描述, $\omega = k_0(\rho Y_{\text{O}_2})^\nu \exp(-E/RT_s)$, 该公式综合考虑了颗粒温度、气相状态、氧化剂浓度等多种因素对反应的影响, 其中 ω 为氧气消耗速率, 单位 $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, ρ 为颗粒表面处空气密度, Y_{O_2} 为颗粒表面处氧气的质量分数, T_s 为颗粒表面温度, k_0 为指前系数, ν 为待定系数, E 为活化能, R 为通用气体常数 ($R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$); 镁颗粒熔化前, 其氧化物会附于表面, 但其氧化物膜并不致密, 模型中认为镁颗粒在熔化前其有效的反应面积为其表面积的一部分; 而镁颗粒完全熔化后, 认为其氧化物是以帽状形态与液态镁合为一个球体; 假设表面反应产生的热量完全由颗粒相吸收;

7) 金属的传热性能远好于气体, 认为同一颗粒温度各处相等;

8) 理想气体, 全场等压、无黏性;

9) 由于环境压力对镁的熔点影响很小 (压力每升高 1000 MPa 镁的熔点只升高 80 K 左右^[9]), 而粉末燃料冲压发动机燃烧室压力在 0.3—0.5 MPa 之间, 所以本模型认为环境压力对镁的熔点无影响. 环境压力对镁沸点的影响规律符合 Clausius-Clapeyron 方程;

10) ρD 为常数, D 为气体扩散系数;

11) 不考虑重力的影响.

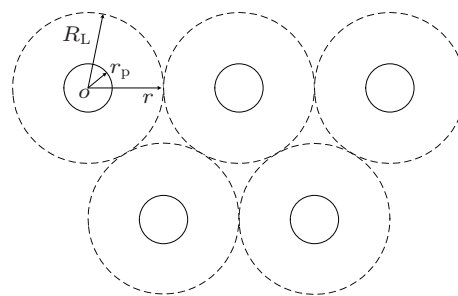


图 1 单一粒径颗粒及其周围气相构成的有限影响体

3 模型的基本方程

3.1 气相控制方程

质量方程

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (\rho_g u r^2) = \dot{\varphi}_m \quad r_p < r < R_L; \quad (1)$$

物质组分方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_g Y_i}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (\rho_g u Y_i r^2) \\ &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho_g D r^2 \frac{\partial Y_i}{\partial r} \right) + \dot{\varphi}_i \\ & r_p < r < R_L, \quad (i = O_2, N_2); \end{aligned} \quad (2)$$

能量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_g c_p T_g}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (\rho_g u c_p T_g r^2) \\ &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho_g D c_p r^2 \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) + \dot{\varphi}_e \\ & r_p < r < R_L; \end{aligned} \quad (3)$$

式中, u 为混合气体径向速度, r 为距有限影响体中心的距离, Y_i 为组分质量分数, c_p 为气相定压比热, T_g 为气相温度, $\dot{\varphi}_m$, $\dot{\varphi}_i$, $\dot{\varphi}_e$ 分别为气相质量、物质组分和能量的源项, 由于在着火阶段, 反应只发生在颗粒表面, 所以上三个源项为 0.

3.2 颗粒相方程

1) 颗粒半径方程

在着火过程中颗粒质量增加率 \dot{m}_p 和纯镁质量减少率 \dot{m}_{Mg} 均由表面反应氧气消耗率 \dot{m}_{O_2} 决定, 即

$$\dot{m}_p = -\dot{m}_{O_2}, \quad \dot{m}_{Mg} = \beta \dot{m}_{O_2}.$$

假设颗粒在表面反应过程中, 疏松状氧化膜的表现密度等于 Mg 的密度

$$\frac{dR_p}{dt} = -\frac{\dot{m}_{O_2}}{4\pi R_p^2 \rho_p}, \quad (4)$$

$$\frac{dr_p}{dt} = \frac{\beta \dot{m}_{O_2}}{4\pi r_p^2 \rho_p}, \quad (5)$$

R_p 为颗粒外核半径, 即氧化膜包覆后颗粒的半径; r_p 为颗粒内核半径, 即除去氧化膜后颗粒的半径; β 为化学反应当量比, 即单位质量的氧气反应消耗镁的质量.

2) 颗粒能量方程

$$\frac{4}{3} \pi R_p^3 \rho_p c \frac{dT_p}{dt} = Q_{surf} - Q_{conv} + Q_{rad}, \quad (6)$$

其中, c 为镁颗粒的比热, $Q_{rad} = A_p \varepsilon \sigma_0 (T_B^4 - T_p^4)$ 为辐射换热, A_p 为镁颗粒表面积, ε 为镁的黑度, σ_0 为 Stephan-Boltzmann 常数, T_B 和 T_p 分别为辐射源和颗粒相温度; $Q_{conv} = A_p h (T_p - T_g)$ 为颗粒与气相对流换热, 换热系数 $h = Nu \cdot \lambda / d_p$, λ 为气相导热系数, 颗粒相与气相没有相对运动, $Nu = 2$; $Q_{surf} = \beta \cdot q \cdot 4\pi r_p^2 \cdot \omega$ 为表面反应释放的热量, q 为镁的燃烧热值.

3.3 状态方程

$$\begin{aligned} P &= \rho_g R_M T_g, \\ \frac{dP}{dt} &= \frac{d\rho_g}{dt} R_M T_g + \frac{dR_M}{dt} \rho_g T_g \\ &+ \frac{dT_g}{dt} \rho_g R_M = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

其中 P 为压强, $R_M = R \cdot \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{M_i}$ 为气相的气体常数, M 为摩尔质量.

3.4 镁表面化学反应动力学

关于镁的表面氧化反应, 前人研究表明镁的氧化膜是多孔疏松状的, 对镁不起保护作用, 镁在着火前为缩核反应. Ezhovskii 和 Ozerov^[10] 通过研究发现, 镁在固态与液态形式下表面反应速率相差很大, 镁温度达到熔点后其氧化速率与熔化之前相比会突然增加. 他分别给出了镁在明显低于熔点时与熔化后的表面氧化反应动力学常数, 其中固态时活化能为 $E_1/R = 34000$ K, 熔化后活化能为 $E_2/R = 15000$ K, 但没有提及处于两者过渡区的表面反应活化能. 关于镁颗粒着火的判据有很多, 主要有 Semenov 判据、设定着火温度、闪光法、颗粒温度突跃点等方法. 不同的着火判据, 得到的着火温度和着火时间也不相同. 其中第 4 种方法符合物理意义且使用较多. 大量实验研究表明, 镁的燃点位于熔点之下的某个范围内, 文献 [11] 中提到镁的着火温度多在 600—630 °C 之间, 樊建锋等^[12] 通过多次实验确定在 885 K 时镁的温度发生突跃, 陈萍和张茂勋^[13] 也通过实验得出镁的燃点为 602.2 °C. 这说明镁在接近熔点之前其表面氧化就开始加剧, 因此本模型取颗粒温度 873 K(固态) 到 923 K(液态) 为过渡区域, 其活化能介于上述两活化能之间, 选取文献 [14] 中的活化能 $\tilde{E} = 200$ kJ/mol. 本模型中具体的表面反应速率如表 1 所示.

表 1 不同阶段表面反应速率

表面反应氧气消耗速率/kg·m ⁻² ·s ⁻¹	
缓慢氧化阶段 (< 873 K)	$\omega_1 = 1.7 \times 10^{12}(\rho Y_{O_2,s})^{0.5} \exp(-34000/T_p)$ [10]
中温过渡阶段 (873—923 K)	$\tilde{\omega} = 3.4 \times 10^{10} Y_{O_2,s} \exp(-200000/RT_p)$ [14]
高温氧化阶段 (> 923 K)	$\omega_2 = 1.7 \times 10^{12}(\rho Y_{O_2,s})^{0.5} \exp(-15000/T_p)$ [10]

3.5 初值条件、边界条件和算法

当 $t = 0$ 时, $Y_{O_2} = 0.232, T_g = T_p = T_0$; 当 $t = \tau$ 时, 在 $r = r_p$ 处, $G = G_{O_2} = \omega$ 表示颗粒表面质量流量为反应消耗的氧气量; $H = h(T_p - T_g)$ 表示颗粒表面能量流量为颗粒/气体换热量; 在 $r = R_L$ 处, $\frac{\partial Y_i}{\partial r} = 0, \frac{\partial T_g}{\partial r} = 0$.

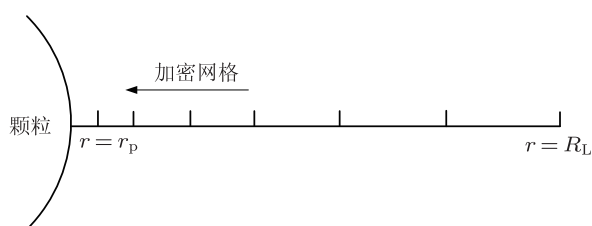


图 2 计算网格的划分

方程 (1)—(7) 中, ρ_g, u, Y_i, T_g 相互耦合, 仅能数值求解. 网格划分如图 2 所示, 在颗粒表面附近网格加密, 使用交错网格、显式上风格式离散求解. 时间步长取 1×10^{-8} s. 以接近发动机工作的数据作为基本工况参数, 如表 2 所示.

4 计算结果及讨论

4.1 颗粒群的着火过程

金属颗粒群中颗粒的着火是一个复杂的过程, 不但受颗粒相温度的控制, 还受群中氧含量的控制.

Annamalai 和 Ryan^[15] 的着火判据为: 当颗粒相温度出现突跃时, 即认为着火发生. 而 Roberts 等^[16] 认为镁着火发生在多相反应转变为气相反应时, 设定镁的沸点为着火点. 本文结合颗粒群的特点, 定义颗粒群的着火如下: 当颗粒温度出现突跃时, 认为着火发生, 但颗粒相温度达到沸点后认为着火成功, 如果颗粒相温度不能达到沸点, 认为着火发生但未成功. 着火时间为颗粒群从开始受热到颗粒温度出现突跃所经历的时间.

图 3 为基准工况下不同时刻有限影响体温度示意图, 图 4 为不同时刻有限影响体内温度的空间分布图. 可以看出, 在 24 ms 之前, 颗粒温度增长速率是缓慢的, 24 ms 之后, 颗粒温度迅速提高, 很短时间内达到了沸点, 着火成功. 而着火过程中气相温度整体提高不大, 只是颗粒表面附近很小区域内的气体升温比较明显. 这主要是因为金属镁燃烧不同于煤、液滴等, 它没有挥发份的析出, 在着火之前气相中没有化学反应, 气相升温只是靠颗粒对气相的表面对流换热, 气相整体的升温由气体导热系数和颗粒-气相表面传热系数控制, 所以仅颗粒表面处气体升温较明显, 而远离颗粒表面处气体升温不大. 而颗粒相升温在颗粒缓慢氧化阶段主要靠吸收辐射热, 达到一定温度后其表面反应产生的热量才主导了其升温, 所以着火时间主要消耗在缓慢氧化阶段. 颗粒相的升温比气相要快, 特别是着火阶段的后期, 由于表面反应剧烈, 其升温速率比气相的升温速率要大许多.

表 2 基准工况数据

气相初温	$T_{g,0} = 673$ K	气相初始氧质量分数	$Y_{O_2,0} = 0.232$
颗粒相初温	$T_{p,0} = 673$ K	初始颗粒半径	$r_{p,0} = 30$ μ m
辐射源温度	$T_B = 1600$ K	固态镁比热容	$c_{(s)} = 1092$ J/(kg·K)
颗粒浓度	$\mu = 1/3$	液态镁比热容	$c_{(l)} = 1411$ J/(kg·K)
传质系数	$\rho D = 5 \times 10^{-5}$ kg/(m·s)	固态镁密度	$\rho_{p(s)} = 1738$ kg/m ³
环境压力	$P = 3.03 \times 10^5$ Pa	液态镁密度	$\rho_{p(l)} = 1580$ kg/m ³
燃烧热值	$q = 25000$ kJ/kg	镁的黑度	$\epsilon = 0.8$

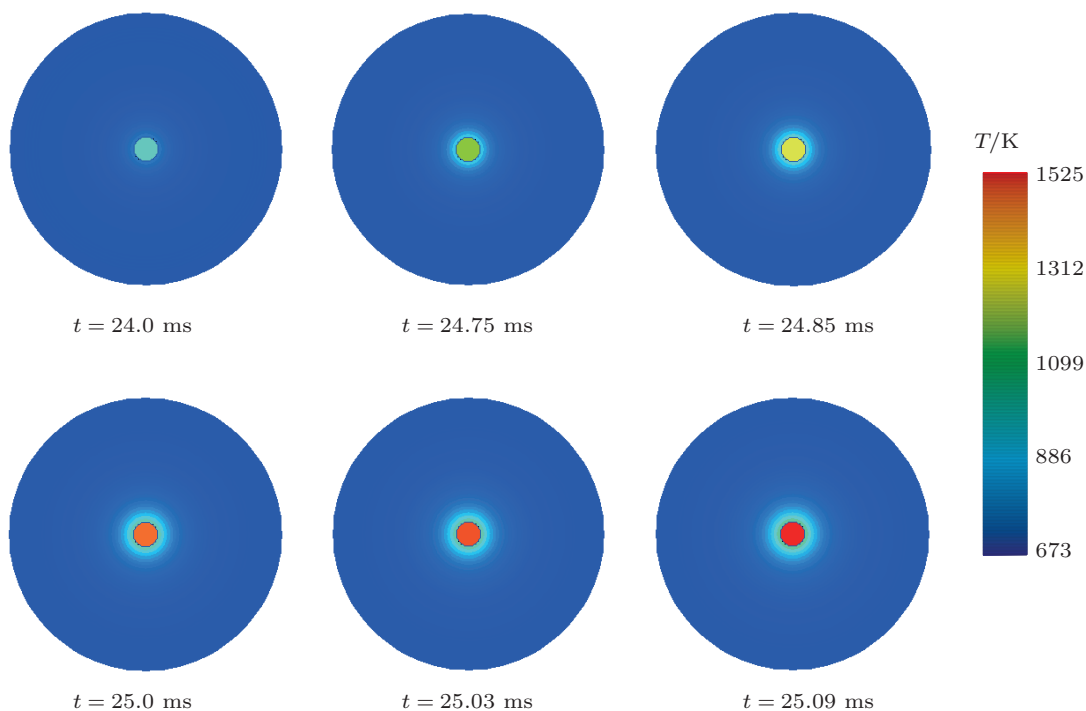


图3 不同时刻气相和颗粒相的温度变化图 $\mu = 1/3, T_{p,0} = T_{g,0} = 673 \text{ K}, P = 3 \text{ atm}, T_B = 1600 \text{ K}, r_{p0} = 30 \text{ }\mu\text{m}, Y_{O_2,0} = 0.232$

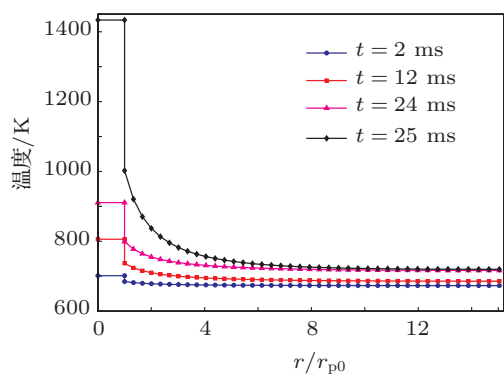


图4 不同时刻有限影响体内温度空间分布 $\mu = 1/3, T_{p,0} = T_{g,0} = 673 \text{ K}, P = 3 \text{ atm}, T_B = 1600 \text{ K}, r_{p,0} = 30 \text{ }\mu\text{m}, Y_{O_2,0} = 0.232$

4.2 颗粒浓度对颗粒群着火的影响

图5和图6分别为颗粒浓度不同时有限影响体温度和氧气组分分布示意图,图7为不同时刻、不同颗粒浓度条件下有限影响体内的气相温度、氧气组分浓度的空间分布图.由图5—7中可见,颗粒浓度小时,有限影响体的体积大,有限影响体内的气相温度升高慢,相应地影响体内的氧气组分浓度减少也慢,着火时间长,到达着火时气相的温度低、氧气组分浓度大;而颗粒浓度大时,变化规律则刚好相反.

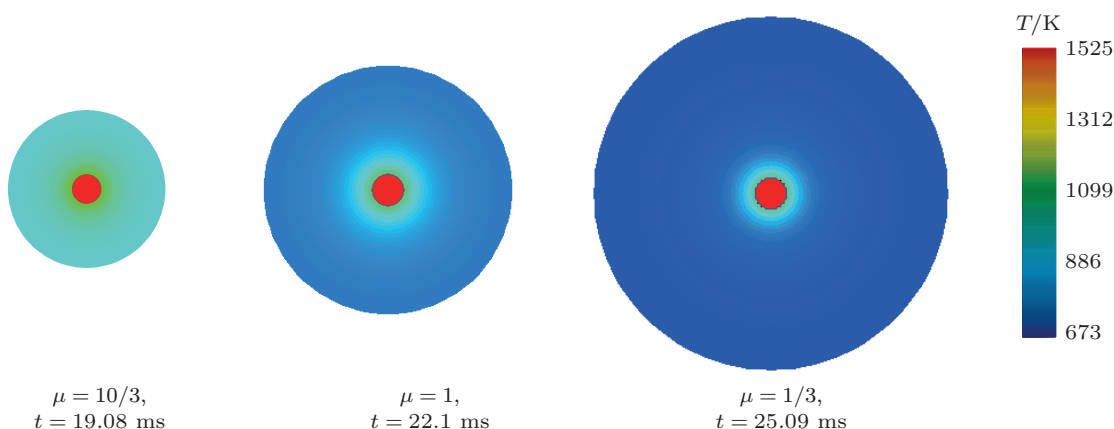


图5 颗粒群着火时有限影响体内温度分布示意图 $T_{p,0} = T_{g,0} = 673 \text{ K}, P = 3 \text{ atm}, T_B = 1600 \text{ K}, r_{p0} = 30 \text{ }\mu\text{m}, Y_{O_2,0} = 0.232$

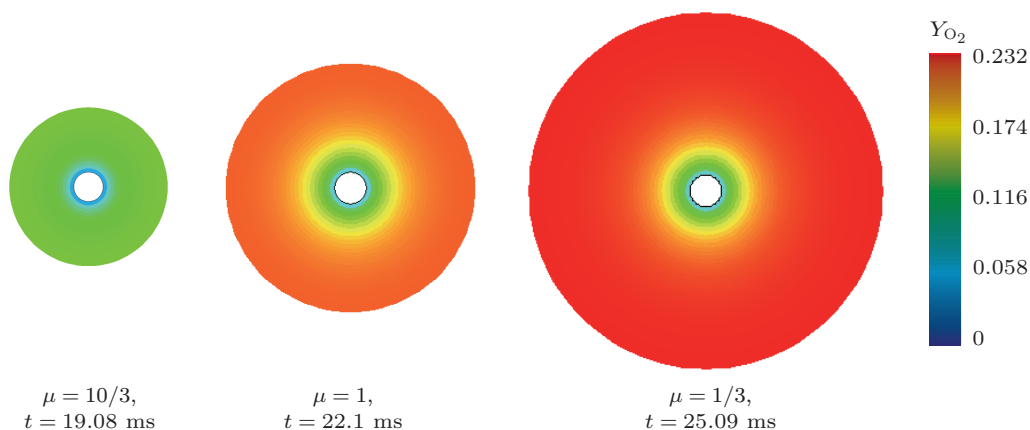


图 6 颗粒群着火时有限影响体内氧气组分 Y_{O_2} 分布示意图 $T_{p,0} = T_{g,0} = 673 \text{ K}$, $P = 3 \text{ atm}$, $T_B = 1600 \text{ K}$, $r_{p0} = 30 \mu\text{m}$, $Y_{O_2,0} = 0.232$

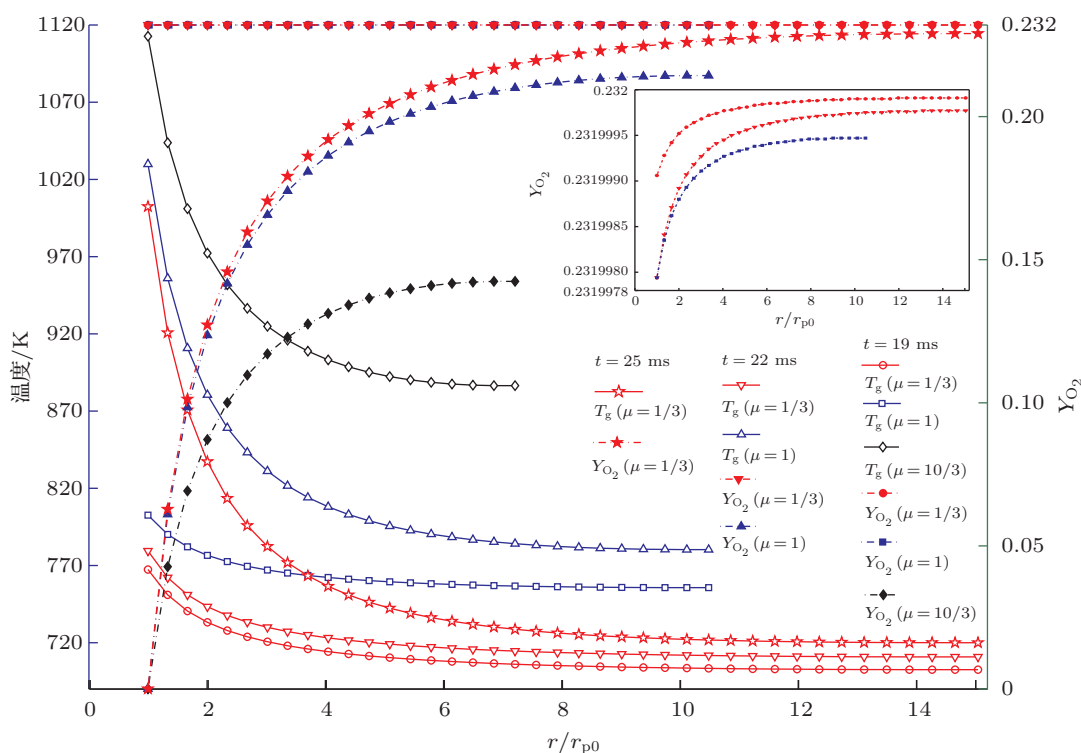


图 7 不同时刻、不同颗粒浓度、有限影响体内气相温度和组分空间分布 $T_{p,0} = T_{g,0} = 673 \text{ K}$, $P = 3 \text{ atm}$, $T_B = 1600 \text{ K}$, $r_{p0} = 30 \mu\text{m}$, $Y_{O_2,0} = 0.232$

图 8 为不同颗粒浓度时颗粒群温度 - 时间曲线图. 由图 8 可以看出, 颗粒群的着火时间随颗粒浓度的减小而增大, 但这种关系不是线性关系, $\mu \in [0.1, 1]$ 时着火时间对颗粒浓度的敏感度比 $\mu \in [1, 10]$ 时大得多. 这是因为颗粒浓度大, 则气相比比例相对少, 颗粒相传给气相的热量能较快提升气相温度, 气相温度的升高则意味着颗粒相向气相的散热将减少, 在颗粒相吸收热辐射及表面反应释放热量不变的情况下, 其散热量的减少无异意味着其自身温度的迅速提升, 也就表现为其着火时间

变短. 但当颗粒浓度增大到一定程度, 颗粒群中氧量也将很少, 颗粒之间对氧气的竞争剧烈, 将导致另一种情形的出现, 如图 8 中 $\mu = 10$ 的曲线, 颗粒温度曲线很早出现了突跃点 (A 点), 但在 B 点之后却出现颗粒温度难以上升的情况. 这是因为在着火的初期, 颗粒对氧气的激烈竞争使整个颗粒群温度迅速上升, 但到了后期氧气含量急剧下降, 颗粒表面反应停滞, 颗粒的热源不复存在, 所以其温度不能继续快速上升, 以至于着火未成功. 所以在颗粒浓度大的情况下, 氧含量将成为决定颗粒群着火成

功与否的控制环节. 在颗粒浓度小的情况下, 气相中的氧含量对颗粒着火而言是充裕的, 颗粒与颗粒之间的氧量、热量等各种竞争都减小, 并且颗粒浓度越小, 颗粒越接近于单颗粒着火, 图 8 中 μ 从 0.2 到 0.1, 着火时间变化不太大, $\mu < 0.1$ 之后着火延迟变化更小就很好地说明了这一点.

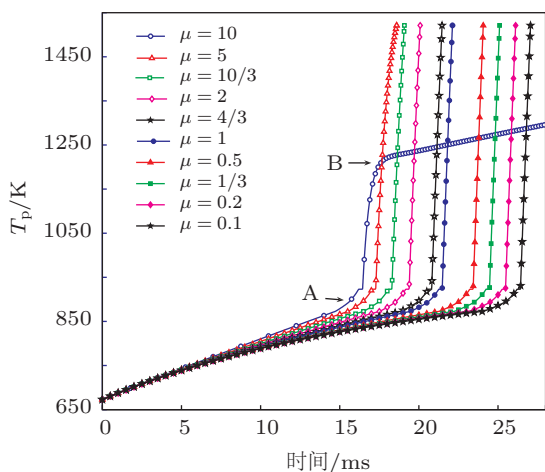


图 8 μ 不同时颗粒温度随时间变化曲线 $T_{p,0} = T_{g,0} = 673 \text{ K}$, $P = 3 \text{ atm}$, $T_B = 1600 \text{ K}$, $r_{p,0} = 30 \mu\text{m}$, $Y_{O_2,0} = 0.232$

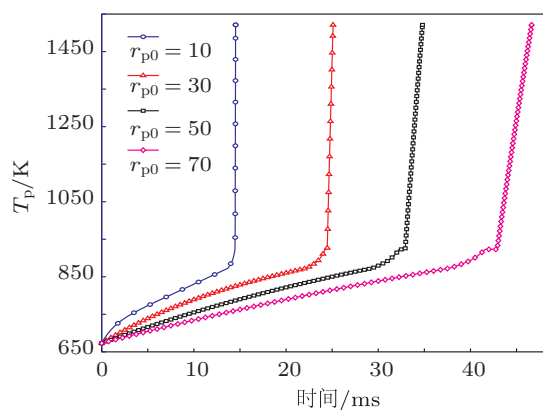


图 9 $r_{p,0}$ 不同时颗粒温度随时间变化曲线 $\mu = 1/3$, $T_{p,0} = T_{g,0} = 673 \text{ K}$, $P = 3 \text{ atm}$, $T_B = 1600 \text{ K}$, $Y_{O_2,0} = 0.232$

4.3 颗粒初始半径对颗粒群着火的影响

由图 9 可见, 随着颗粒粒径的减小, 颗粒群的着火时间缩短. 此结论在煤粉工业及粉尘爆炸等领域中被广泛认可. 因为颗粒越小, 其比表面积越大, 在其他条件都不变的情况下, 单位质量燃料颗粒吸收辐射热量和反应释放的热量也就越多, 当然温升速度比较快, $r_{p0} = 10 \mu\text{m}$ 的小颗粒温度曲线甚至连熔化平台都已消失. 所以细微颗粒的粉尘云其着

火时间极短, 爆炸的危险性也极大.

4.4 环境压力对颗粒群着火的影响

图 10 为环境压力不同对颗粒群着火的影响. 由图 10 可见, 压力对颗粒群着火的影响并不大, 随压力的增大, 颗粒群的着火时间略有提前. 杨成虎^[17] 在水蒸气环境中进行了镁的着火实验研究, 他分别在 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 MPa 等不同的压力下观察镁的着火性能, 发现镁的着火温度和着火时间随压力的不同变化很小, 得出了环境压力对镁颗粒的着火影响不大的结论, 这与本模型的结论是一致的. 这是因为镁颗粒的着火过程主要是由颗粒的加热速度控制的, 而颗粒的受热在很长一段时间内是辐射源的热辐射占主导地位, 而压力恰恰不对热辐射起作用, 所以压力对颗粒群的着火过程影响不大. 据此结论可知, 在常压下进行颗粒群点火实验得到的结论及规律可以应用于粉末燃料冲压发动机燃烧室的高压条件下 (粉末燃料冲压发动机燃烧室压力在 0.3—0.5 MPa 之间).

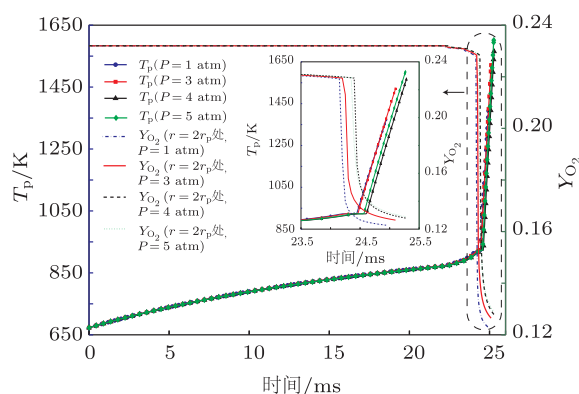


图 10 压强 P 对颗粒群着火的影响 $\mu = 1/3$, $T_{p,0} = T_{g,0} = 673 \text{ K}$, $T_B = 1600 \text{ K}$, $r_{p,0} = 30 \mu\text{m}$, $Y_{O_2,0} = 0.232$

4.5 氧气浓度对颗粒群着火的影响

图 11 为气相中氧气浓度对颗粒群着火的影响. 由图 11 可知, 在一定范围内, 氧气浓度对颗粒群着火的影响不大, 气相中氧气的质量分数从 0.2 变化到 0.5, 但颗粒相的温度曲线变化并不是很明显. Cassel 和 Liebman^[18] 研究发现, 氧气浓度分别为 23% 和 100% 时, 镁的着火温度却没有明显变化. 杨成虎^[17] 也通过镁在水蒸气环境中的实验研究发现氧化剂浓度对镁的着火温度和着火时间都没有太大影响. 这些实验结果都验证了本模型的正确性.

分析其原因主要是因为是在镁的着火过程中, 氧化剂扩散不是反应速率的控制环节, 因此氧化剂浓度对颗粒反应放热的影响较小, 从而对镁颗粒群着火时间影响并不是很显著. 但本模型还发现, 氧气浓度达到足够小的程度后, 对颗粒群着火的影响开始显著, 图中当氧气的质量分数从 0.2 变到 0.1 时, 颗粒相的温度曲线产生了较大的变化, 这主要是因为气相中氧量减小到一定程度后, 氧量对反应速率的控制环节变得突然重要起来.

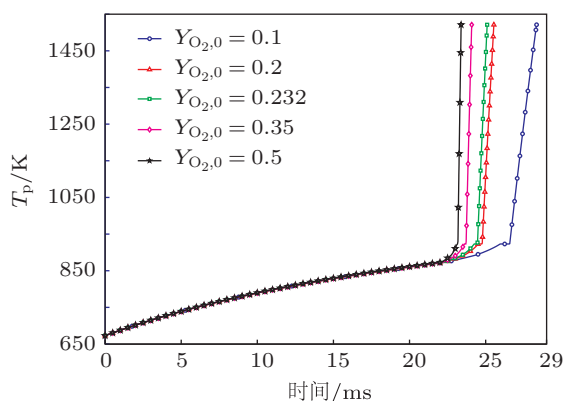


图 11 Y_{O_2} 不同时颗粒温度随时间变化曲线 $\mu = 1/3$, $T_{p,0} = T_{g,0} = 673$ K, $P = 3$ atm, $T_B = 1600$ K, $r_{p,0} = 30$ μm

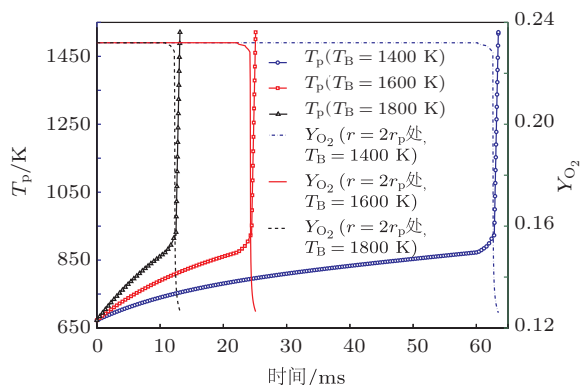


图 12 辐射源温度 T_B 对颗粒群着火的影响, $\mu = 1/3$, $T_{p,0} = T_{g,0} = 673$ K, $P = 3$ atm, $r_{p,0} = 30$ μm , $Y_{O_2,0} = 0.232$

4.6 辐射源温度及气相、颗粒相初温对颗粒群着火的影响

图 12 为辐射源温度对颗粒群着火的影响. 由图 12 可见, 辐射源温度对颗粒群着火的影响巨大, 辐射源温度越高, 着火时间越短, $T_B = 1800$ K 时着火时间缩减为 $T_B = 1400$ K 时的 1/6. 可知提高辐射源温度是缩短颗粒群着火时间的有效途径.

图 13 为气相和颗粒相初温对颗粒群着火的影响. 由图 13 可见, 气相和颗粒相初温对颗粒群着火的影响十分显著, 随着气相和颗粒相初温的升高, 着火明显加快. 因为金属镁在着火前是没有挥发份析出的, 它的升温在前期以吸收辐射热为主, 后期以表面反应释放热为主, 其着火所耗费的时间主要集中在剧烈表面反应之前; 表面反应加剧后由于反应放热量大, 其升温势头一般很迅速, 很短时间内就可实现着火. 所以提高气相和颗粒相的初温, 实际上是直接地缩短了其缓慢氧化阶段的时间, 进而极大地缩短了着火的时间.

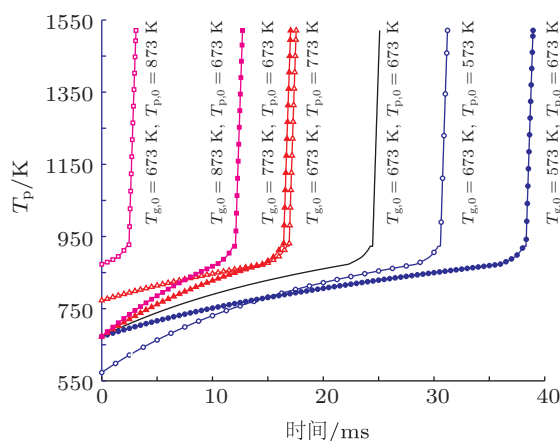


图 13 $T_{g,0}$, $T_{p,0}$ 不同时颗粒温度随时间变化曲线 $\mu = 1/3$, $P = 3$ atm, $T_B = 1600$ K, $r_{p,0} = 30$ μm , $Y_{O_2,0} = 0.232$

5 结论

本文建立了镁颗粒群着火的一维非稳态有限影响体模型, 数值模拟了镁颗粒群的着火过程, 获得了颗粒着火的产生过程和气相温度、组分在有限影响体内的分布. 研究表明, 颗粒群着火的时间主要消耗在缓慢氧化阶段, 在着火过程中气相温度整体提高不大, 只是颗粒附近很小区域内温升比较明显; 当镁颗粒表面反应加剧之后, 温度急剧上升, 迅速达到着火, 而其周围的气相温度上升速度却远小于颗粒的温升速率.

随着颗粒浓度的增大, 着火变得容易, 但该值增大到一定程度后, 又不利于着火发生. 颗粒粒径对颗粒群着火的影响很明显, 粒径越小, 着火越容易, 选取小粒径颗粒将显著提高颗粒群的着火性能. 环境压力对颗粒群着火影响很小. 气相中氧气浓度在一定范围内对颗粒群着火的影响不大, 但当气相中氧气浓度足够低的时候, 其对着火的负作用将不

可忽视. 气相、颗粒相初温和辐射源温度对颗粒群着火的影响是巨大的, 提高这三者的温度将极大缩短着火时间.

本模型较全面地反映了镁颗粒群着火的机理,

与实际情况相符, 并能将单颗粒着火与群体着火联系起来, 具有一定的实用价值, 可以用来指导粉末燃料冲压发动机预燃室一次空燃比的设计.

- [1] Shen H J, Xia Z X, Hu J X, Luo Z B 2007 *J. Solid Rocket Technol.* **30** 474 (in Chinese) [申慧君, 夏智勋, 胡建新, 罗振兵 2007 固体火箭技术 **30** 474]
- [2] Liu X Z, Yu S Z, Li C J 2007 *The Power System of Cruise Missile* (Vol. 2) (Beijing: China Astronautics Publishing House) p284 (in Chinese) [刘兴洲, 于守志, 李存杰 2007 飞航导弹动力装置(下) (北京: 中国宇航出版社) 第 284 页]
- [3] Cen K F, Yao Q, Luo Z Y, Li X T 2002 *Advanced Combustion Theory* (Hangzhou: Zhejiang University Press) p329 (in Chinese) [岑可法, 姚强, 骆仲浚, 李绚天 2002 高等燃烧学 (杭州: 浙江大学出版社) 第 329 页]
- [4] Annamalai K, Ryan W 1992 *Prog. Energy Combust. Sci.* **18** 221
- [5] Nagata H, Kudo I, Ken'ichi, Nakamura S, Takeshita Y 2002 *Combust. Flame* **129** 392
- [6] Brzustowski T A, Twardus E M, Wojcicki S, Sobiesiak A 1979 *AIAA J.* **17** 1234
- [7] Chiu H H, Kim H Y, Croke E J 1982 *Nineteenth Symposium (International) on Combustion* Haifa, Israel, August 8–13, 1982 p971
- [8] Bellan J, Cuffel R 1983 *Combust. Flame* **51** 55
- [9] Zhang J, Zhang Z H 2004 *Magnesium Alloy and Applications* (Beijing: Chemical Industry Press) p8 (in Chinese) [张津, 章宗和 2004 镁合金及应用 (北京: 化学工业出版社) 第 8 页]
- [10] Ezhovskii G K, Ozerov E S 1978 *Combust. Explo. Shock Waves* **13** 716
- [11] Breiter A L, Mal'tsev V M, Popov E I 1978 *Combustion. Explosio. Shock Waves* **13** 475
- [12] Fan J F, Yang G C, Zhou Y H, Xu J, Zhang Z F, Shi L K 2006 *Foundry Technol.* **27** 605 (in Chinese) [樊建锋, 杨根仓, 周尧和, 徐骏, 张志峰, 石力开 2006 铸造技术 **27** 605]
- [13] Chen P, Zhang M X 2002 *Special Casting and Nonferrous Alloys-2002 Year Die-Casting Special Issue* 323 [陈萍, 张茂勋 2002 特种铸造及有色合金-2002 年压铸专刊 323]
- [14] Elkotb M M, Salama N, Nassef I 1996 *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion* Napoli, Italy, July 28–August 2, 1996 p1937
- [15] Annamalai K, Ryan W 1993 *Prog. Energy Combust. Sci.* **19** 383
- [16] Roberts T A, Burton R L, Krier H 1993 *Combust. Flame* **92** 125
- [17] Yang C H 2008 *Ph. D. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese)[杨成虎 2008 博士学位论文 (杭州: 浙江大学)]
- [18] Cassel H M, Liebman I 1959 *Combust. Flame* **3** 467

Numerical studies of unsteady ignition of pulverized magnesium particle cloud*

Yang Jin-Zhao[†] Xia Zhi-Xun Hu Jian-Xin

(*Science and Technology on Scramjet Laboratory, College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

(Received 3 March 2012; revised manuscript received 26 April 2012)

Abstract

A one-dimensional unsteady magnesium particle cloud ignition model with finite influencing sphere is established. The behavior of ignition of magnesium particle cloud is numerically simulated. The result shows that when the reaction is speeded up on the surface of magnesium particle, the temperature of the particle phase rises rapidly up to ignition temperature, while the surrounding air is much slower in temperature rising than particles; the gas temperature rising is unobvious in the whole sphere in the ignition process, albeit it is significant near the particle surface. The effects of the interior parameters and the environmental parameters on the ignition of the magnesium particle cloud are analyzed. With the increase of particle concentration, the particle cloud becomes easier to be ignited, and reduction in its ignition time delay can be seen. However, when the particle concentration has increased to some specific extent and its further increase will be adverse to the ignition of the particle cloud. The influence of the environmental pressure on the ignition of particle cloud is insignificant, and the ignition performance of the particle cloud almost keeps constant in a range of 1–5 atm. The oxygen concentration in the gas phase also has a weak effect on the ignition performance of particle cloud, but when the oxygen concentration is very low, the effect will significantly increase. The particle size, the initial temperature of the gas/particle and the radiant source have all great influences on the ignition performance of the particle cloud. Small particle and high temperature are helpful for speeding up the ignition process. The tendency obtained by numerical simulation coincides well with that of the experimental results from the literature.

Keywords: powdered fuel ramjet, ignition of magnesium particle, particle cloud

PACS: 47.70.-n, 47.40.pq, 82.60.cx

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51006118).

[†] E-mail: yjzhnenan@hotmail.com