镁颗粒群着火和燃烧过程数值模拟*

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 8 月 28 日 收到; 2012 年 11 月 27 日 收到修改稿)

建立了一维非稳态球形镁颗粒群的着火燃烧模型, 数值模拟镁颗粒群的着火和燃烧过程, 研究表明, 颗粒群着火首先发生在颗粒群边界, 随后初始的燃烧火焰会分离为两个, 一个向颗粒群内部传播, 一个向外部传播, 最终内部火焰消失, 外部火焰维持并控制着整个颗粒群的燃烧; 内火焰向颗粒群内部传播过程中, 传播速度会逐渐加快, 且火焰温度值呈逐渐降低趋势. 分析了颗粒群内部参数和环境参数对镁颗粒群着火燃烧的影响. 随颗粒浓度的增大, 颗粒群着火时间略有增长, 但火焰传播速度更快, 燃烧稳定时火焰球尺寸也更大. 颗粒群初温越高, 则颗粒群着火时间越短, 火焰传播速度也会加快, 但燃烧稳定时火焰球尺寸基本不变. 环境温度对颗粒群着火燃烧的影响较复杂, 环境温度越高, 颗粒群着火时间越短, 但火焰传播速度却越慢, 燃烧稳定时火焰球尺寸变化很小. 颗粒粒径和辐射源温度对颗粒群着火燃烧的影响较显著, 颗粒粒径越小或辐射源温度越高, 则颗粒群着火时间越短, 火焰传播速度越快, 燃烧稳定时火焰球尺寸也越大. 数值模拟结果与文献中试验结果相一致.

关键词: 粉末燃料冲压发动机, 镁着火燃烧, 颗粒群

PACS: 47.70.−n, 47.70.pq, 82.60.cx **DOI:** 10.7498/aps.62.074701

1 引 言

粉末燃料冲压发动机是一种新概念发动机, 具有能量高、密度比冲大、推力可调、可多次启动、安全性好等优点 [1]. 它使用高能量的金属粉末做为燃料, 粉末燃料在流化气的作用下以两相流的形式进入预燃室, 直接与冲压空气进行反应. 其与传统的固体火箭冲压发动机燃烧特性有所不同, 燃料以气固两相流形式喷入预燃室, 在整个预燃室内形成浓度较大的粉尘云, 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.

诸多研究表明, 颗粒团聚是稠密气固两相流中的一个重要现象 [2], 白丁荣等 [3] 解释为颗粒在气流湍流时倾向于以较大概率相互屏蔽, 即一个颗粒进入另一个颗粒背侧尾涡区, 逐个累积, 形成絮状集体. 刘敏等 [4] 提出, 在中高浓度、有时甚至低浓度下, 气固两相流中会出现颗粒分布不均匀、局部颗粒聚集的现象. 刘春嵘等 [5] 在气粒并流向上流动实验中观测到了壁面附近出现类似 “沙丘” 形状的大尺度准静止颗粒团. 石惠娴等 [6] 对循环流化床冷态流场进行了颗粒团可视化实验, 在床内发现了颗粒微团、松散型颗粒云团、环核型颗粒团、致密型颗粒团等多种颗粒群形态. 可见, 颗粒的团聚在气固两相流中是普遍存在的, 粉末燃料冲压发动机工作过程中不能不考虑颗粒的团聚效应.

大量研究表明, 多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 [7] (cooperative effect)” (煤粉燃烧中称为 “浓度效应”)[8]. 研究普遍认为, 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: 对热量和氧量的竞争, 因浓度变化而延长或缩短着火时间, 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

* 国家自然科学基金 (批准号: 51006118) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yjzhhenan@hotmail.com

© 2013 中国物理学会 Chinese Physical Society

颗粒之间相互作用还了解得很不清楚.

目前国内外学者对颗粒间相互作用及颗粒群的研究多集中在液雾燃料、煤粉、易挥发的固体燃料等, Chiu 等 [9,10] 最早提出了 “液滴群燃烧” 的概念, 并引入了群燃烧数 G 来度量液滴群中气液两相之间相互作用的程度, 研究表明, 在 $G < 0.01$, $0.01 < G < 0.1$, $0.1 < G < 100$, $G > 100$ 的情况下液滴群将依次经历单滴燃烧, 内部群燃烧, 外部群燃烧, 外壳燃烧等不同阶段. 并在 1978 年进一步分析了喷雾燃烧火焰的结构特点 [11]. Bellan 等 [12] 基于总的液滴群两相混合物守恒关系, 引入 “影响球” 的概念, 建立了非稀薄喷雾液滴群蒸发模型, 并在 1990 年将此模型进一步推广到液滴群的燃烧 [13]. Annamalai 等 [14] 建立了稳态的焦炭颗粒群燃烧模型, 分析了颗粒群内颗粒浓度对着火过程的影响. 并与 Ryan 等合作在 1991—1994 年系统分析了液滴群、煤粉群的汽化、燃烧特性及在此过程中颗粒间的相互影响 [15−17]. 还有一些学者通过研究少数几个颗粒在特殊几何分布下的燃烧, 分析颗粒间相互作用对群体燃烧的影响. Brzustowski 等 [18] 通过对任意尺寸双颗粒燃烧过程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, 其燃烧速率最小, 并通过理论计算出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, 最后通过失重条件下的实验验证了其理论. Nagata 等 [19] 通过微重力实验研究颗粒在平面特殊几何分布下的燃烧特性, 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. Daisuke 等 [20,21] 通过微重力实验研究颗粒在三维特殊几何分布下的燃烧特性, 发现颗粒呈六方紧密堆积结构时点火延迟时间和燃烧时间较长, 而立方紧密堆积时燃烧时间较短; 随颗粒间距减小或颗粒初始粒径增加, 燃烧区达到最大值的时间将延长并且燃烧区的膨胀率将增加. Masato 等 [22,23] 则研究了线状排列颗粒的火焰传播特性. Liu 等 [24] 通过数值方法研究了特殊几何分布条件下的碳球颗粒的燃烧过程. 另外一些学者则通过研究粉尘云的燃烧过程来分析颗粒群燃烧时颗粒之间的相互作用. Du 等 [25] 建立了一维圆柱形煤粉尘云燃烧模型, 发现了颗粒群中的双火焰结构, 并通过实验验证了其理论. Edward[26,27] 通过微重力和重力实验对比研究方形燃烧室内镁粉尘云的着火燃烧, 观测了镁粉尘云燃烧时的火焰结构、火焰传播速度、颗粒的再着火及颗粒的运动等特性. Sun 等 [28,29] 通过实验研究了铁、锆粉尘云的着火燃烧特性, 观测到了粉尘云的微细火焰结构及火焰前缘处颗粒浓度变化. Zhao 等 [30] 通过数值方法研究了球形煤粉尘云的燃烧特性. 杨晋朝等 [31] 引入有限影响体模型研究了镁颗粒群的非稳态着火过程.

国内外学者对金属颗粒群燃烧及颗粒间相互作用的研究较少, 基于粉末燃料冲压发动机使用镁金属颗粒做为燃料并且在预燃室内颗粒浓度较大的现状, 有必要对镁颗粒群的着火燃烧机理进行研究. 又因为颗粒在发动机内停留时间极短, 如何尽快使颗粒实现着火并迅速燃烧是提高发动机燃烧效率的关键, 揭示粉末燃料冲压发动机燃烧特性的重点在于揭示镁颗粒群的燃烧特性, 所以详细了解镁颗粒群的着火燃烧过程对确定发动机设计参数及提高发动机比冲是非常重要的. 本文以处于静态环境中的镁颗粒群做为研究对象, 基于质量、能量及组分方程, 详细考虑镁颗粒蒸发和均相、异相反应, 建立了一维非稳态球形镁颗粒群着火燃烧模型. 数值模拟镁颗粒群的着火和燃烧过程, 研究颗粒群着火时间、火焰结构、燃烧过程等特性, 并分析镁颗粒浓度、颗粒粒径、环境温度、颗粒群初始温度、辐射源温度等参数对颗粒群着火燃烧的影响.

2 模型的基本思想及假设

镁粉气固两相流喷入预燃室后, 颗粒浓度分布总是非均匀的, 颗粒在复杂的相互作用下聚集成团, 做为一个整体流体团在两相流场中运动. 在粉末燃料冲压发动机内, 每个颗粒群都处于不断破碎和形成的过程之中, 但就宏观而言, 发动机内每一时刻都是有颗粒群存在的. 本文所指的颗粒群是粉末燃料冲压发动机燃烧室内气固两相流中颗粒浓度较大的局部颗粒群体. 如图 1 所示, 本模型考虑镁颗粒群为球形, 颗粒群内包括镁颗粒与气体, 半径为 R_{c}, 其中均匀分布着直径为 d_{p} 的镁颗粒, 颗粒群处于较大气体环境中, 与周围气体相对速度为 0. 整个颗粒群处于温度为 T_{B} 的黑体辐射和温度为 T_{∞} 的高温空气包围之中, 初始时刻颗粒群内颗粒相与气相初温均为 T_0, 在辐射加热和对流换热共同作用下, 颗粒群内的镁颗粒依次升温、熔化、着火燃烧, 最后颗粒群实现燃烧. 本模型主要假设如下:

1) 镁颗粒群为球形, 处于高温空气和热辐射环境中.

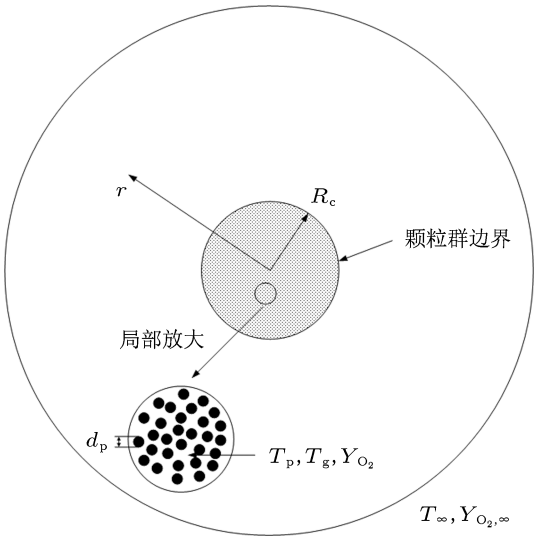

图 1 单一粒径颗粒组成的环形颗粒群

2) 镁颗粒为点源, 且空间位置固定.

3) 气相不参与辐射换热. 镁颗粒为灰体, 各颗粒之间的辐射换热相互抵消, 只考虑颗粒与辐射源之间的辐射换热.

4) 同一颗粒的温度各处相同.

5) 颗粒群中颗粒与气相之间除化学反应引起的 stephan 流外无相对运动.

6) 颗粒与气相不等温, 两者通过对流换热的形式热交换.

7) 空气由氧气和氮气组成, 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: 2Mg(凝)+O_2(气)→2MgO(固), 为一步反应. 反应速率由 Arrhenius 公式描述, $\omega_{\text{hete}} = k_0(\rho Y_{O_2})^{\nu}\exp(-E/RT_s)$, 其中 ω_{hete} 为表面反应氧气消耗速率, 单位 kg/(m^2·s), ρ 为颗粒表面处气相密度, 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. 颗粒完全熔化后至达到沸点之前, 不考虑镁的汽化, 即认为颗粒仍只发生表面反应. 颗粒达到沸点后进入燃烧阶段, 气态镁与空气进行均相反应, 气态镁与氧气的空间均相反应按下式进行: 2Mg(气)+O_2(气)→2MgO(凝/气), 为一步反应. 反应速率由 Arrhenius 公式描述, $\omega_{\text{homo}} = k_0 Y_{O_2} Y_{Mg}\exp(-E/RT)(\rho^2/M_{Mg})$, 其中 ω_{homo} 为气相反应氧气消耗速率, 单位 kg/(m^3·s), ρ 为混合气密度, Y_{O_2} 和 Y_{Mg} 为氧气和气态镁的质量分数, T 为混合气温度, k_0 为指前系数, E 为活化能, M_{Mg} 为镁的摩尔质量, 如果颗粒相表面氧气质量分数不为 0 则同时发生表面反应, 反应速率按上述表面反应速率公式描述.

镁颗粒熔化前, 其氧化物附于表面, 形成与颗粒同心的球壳, 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内核表面的一部分. 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. 镁颗粒达到沸点后将气化与空气发生均相反应, 生成气态 MgO, 部分气态 MgO 随后再凝结为液态或固态, 对这一复杂过程, 本模型中简化处理, 认为反应按一定的比例生成气相 MgO 和凝相 MgO (气相 MgO 比例为 φ, 凝相 MgO 为 $1-\varphi$), 而这个比值与反应所处温度 T 有关. 模型中认为气相反应生成的凝相 MgO 为 “极小” 颗粒, 均匀弥散在气相中形成尘埃, 与气相同温, 随气相运动. 又因为凝相 MgO 密度远大于气相, 所以不计其体积. 均相反应产生的热量由气相吸收. 颗粒相汽化所需要的热量由气相对颗粒相的对流换热、颗粒相表面反应放热、颗粒相吸收辐射热三部分组成. 燃烧热值 q 与反应物、生成物的温度及物态都有关.

8) 理想气体, 全场等压、无黏性.

9) 环境压力不影响镁的熔点, 对镁沸点的影响规律符合 Clausius-Clapeyton 方程.

10) ρD 为常数.

11) 不考虑重力的影响.

3 模型的基本方程

3.1 气相控制方程

本模型中认为气相反应生成的凝相 MgO 为 “微小” 尘埃, 计算中将其做为 “准气相” 处理, 可随气体运动, 与气体同温, 有一定的扩散能力, 但对压力没有贡献.

1) 质量方程

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(\rho_g u r^2) = S_m, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho_{powd}}{\partial t} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(\rho_{powd} u r^2) = D_{powd}\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial \rho_{powd}}{\partial r}\right) + S_{m,powd}. \tag{2}$$

2) 组分方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g Y_i) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(\rho_g u Y_i r^2)$$

$$=\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(\rho_{\mathrm{g}}Dr^2\frac{\partial Y_i}{\partial r}\right)+S_i, \tag{3}$$

$i=\mathrm{O_2}, \mathrm{N_2}, \mathrm{Mg}, \mathrm{MgO}$ 分别为氧气, 氮气, 气相镁, 气相氧化镁.

3) 能量方程

$$\begin{aligned}&\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\mathrm{g}}c_{\mathrm{g}}T_{\mathrm{g}})+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(\rho_{\mathrm{g}}uc_{\mathrm{g}}T_{\mathrm{g}}r^2)\\&+\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\mathrm{powd}}c_{\mathrm{MgO(c)}}T_{\mathrm{g}})\\&+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(\rho_{\mathrm{powd}}uc_{\mathrm{MgO(c)}}T_{\mathrm{g}}r^2)\\=&\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(\rho_{\mathrm{g}}Dc_{\mathrm{g}}r^2\frac{\partial T_{\mathrm{g}}}{\partial r}\right)+S_{\mathrm{e}},\end{aligned} \tag{4}$$

式中, ρ_{powd} 为 MgO 尘埃的质量浓度, 即单位体积中包含 MgO 尘埃的质量 (kg/m^3). D_{powd} 为尘埃的质扩散系数, S_{m}, $S_{\mathrm{m,powd}}$, S_i, S_{e} 分别为气相质量、MgO 尘埃质量、物质组分和能量源项.

$r<R_{\mathrm{c}}$ 时,

$$\begin{aligned}&S_{\mathrm{m}}=n\dot{m}_{\mathrm{vap}}-n\dot{m}_{\mathrm{O_2,hete}}-\dot{m}_{\mathrm{O_2,homo}}\\&\quad-\dot{m}_{\mathrm{Mg,homo}}+\dot{m}_{\mathrm{MgO(g),homo}},\\&S_{\mathrm{m,powd}}=\dot{m}_{\mathrm{MgO(c),homo}},\\&S_{\mathrm{O_2}}=-n\dot{m}_{\mathrm{O_2,hete}}-\dot{m}_{\mathrm{O_2,homo}},S_{\mathrm{N_2}}=0,\\&S_{\mathrm{Mg}}=-\dot{m}_{\mathrm{Mg,homo}}+n\dot{m}_{\mathrm{vap}},\\&S_{\mathrm{MgO}}=\dot{m}_{\mathrm{MgO(g),homo}},\\&S_{\mathrm{e}}=nhA_{\mathrm{p}}(T_{\mathrm{g}}-T_{\mathrm{p}})-n\dot{m}_{\mathrm{O_2,hete}}T_{\mathrm{g}}c_{\mathrm{O_2}}\\&\quad+n\dot{m}_{\mathrm{vap}}T_{\mathrm{b}}c_{\mathrm{Mg(g)}}-\dot{m}_{\mathrm{O_2,homo}}T_{\mathrm{g}}c_{\mathrm{O_2}}\\&\quad-\dot{m}_{\mathrm{Mg,homo}}T_{\mathrm{g}}c_{\mathrm{Mg(g)}}\\&\quad+\dot{m}_{\mathrm{MgO(g),homo}}T_{\mathrm{g}}c_{\mathrm{MgO(g)}}\\&\quad+\dot{m}_{\mathrm{MgO(c),homo}}T_{\mathrm{g}}c_{\mathrm{MgO(c)}}+Q_{\mathrm{homo}}.\end{aligned}$$

$r>R_{\mathrm{c}}$ 时,

$$\begin{aligned}&\tilde{S}_{\mathrm{m}}=\dot{m}_{\mathrm{MgO(g),homo}}-\dot{m}_{\mathrm{O_2,homo}}-\dot{m}_{\mathrm{Mg,homo}},\\&\tilde{S}_{\mathrm{m,powd}}=\dot{m}_{\mathrm{MgO(c),homo}},\\&\tilde{S}_{\mathrm{O_2}}=-\dot{m}_{\mathrm{O_2,homo}},S_{\mathrm{N_2}}=0,\\&S_{\mathrm{Mg}}=-\dot{m}_{\mathrm{Mg,homo}},S_{\mathrm{MgO}}=\dot{m}_{\mathrm{MgO,homo}},\\&\tilde{S}_{\mathrm{e}}=-\dot{m}_{\mathrm{O_2,homo}}T_{\mathrm{g}}c_{\mathrm{O_2}}-\dot{m}_{\mathrm{Mg,homo}}T_{\mathrm{g}}c_{\mathrm{(g)}}\\&\quad+\dot{m}_{\mathrm{MgO,homo}}T_{\mathrm{g}}c_{\mathrm{MgO(g)}}\\&\quad+\dot{m}_{\mathrm{MgO(c),homo}}T_{\mathrm{g}}c_{\mathrm{MgO(c)}}+Q_{\mathrm{homo}}.\end{aligned}$$

n 为颗粒群中颗粒的数密度 (particel/m^3), $\dot{m}_{\mathrm{O_2,hete}}$ 为单个镁颗粒表面反应消耗氧气速率 (kg/s); $\dot{m}_{\mathrm{vap}}$ 为单个镁颗粒蒸发速率 (kg/s); $\dot{m}_{\mathrm{O_2,homo}}$ 和 $\dot{m}_{\mathrm{Mg,homo}}$ 分别为均相反应消耗氧气和气相镁速率 (kg/m^3·s); $\dot{m}_{\mathrm{MgO(c),homo}}$ 和 $\dot{m}_{\mathrm{MgO(g),homo}}$ 分别为均相反应生成凝相和气相氧化镁速率 (kg/m^3·s), 均相反应按一定比值生成气相和凝相氧化镁, 该比值与反应所处温度有关; Q_{homo} 为均相反应释放的热量, $Q_{\mathrm{homo}}=\omega_{\mathrm{homo}}\cdot\beta\cdot q$ (J/m^3·s), 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, q 为气相反应的燃烧热 (J/kg), 该值与反应物和生成物的温度及物态都有关. c_{O2}, $c_{\mathrm{Mg(g)}}$, $c_{\mathrm{MgO(g)}}$, c_{g} 分别为氧气、气态镁、气态氧化镁、混合气的定压比热容, 其中 $c_{\mathrm{g}}=\sum c_iY_i$, $i=\mathrm{O_2}, \mathrm{N_2}, \mathrm{Mg}, \mathrm{MgO}$; $c_{\mathrm{MgO(c)}}$ 为凝相氧化镁的比热容. 比热容均为温度的函数. 在 S_{e} 中, 方程右边第 1 项为对流换热, 第 2—7 项分别为表面反应消耗氧气、镁汽化、均相反应消耗氧气和均相反应消耗气相镁、均相反应生成气相氧化镁和氧化镁尘埃的热焓. 在 $\tilde{S}_{\mathrm{e}}$ 中, 方程右边第 1—4 项分别为均相反应消耗氧气和均相反应消耗气相镁、均相反应生成气相氧化镁和氧化镁尘埃的热焓.

3.2 颗粒相方程

1) 颗粒半径方程

假设在着火阶段, 颗粒只发生表面反应, 而疏松状氧化膜的表观密度等于凝相 Mg 的密度.

$$\rho_{\mathrm{p}}\cdot 4\pi r_p^2\frac{\mathrm{d}r_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}=-4\pi r_{\mathrm{p}}^2\cdot\omega_{\mathrm{hete}}\cdot\beta, \tag{5}$$

$$\rho_{\mathrm{p}}\cdot 4\pi R_p^2\frac{\mathrm{d}R_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}=4\pi r_{\mathrm{p}}^2\cdot\omega_{\mathrm{hete}}, \tag{6}$$

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. 颗粒在熔化之后, 沸腾之前, 认为氧化物以帽状形式与液态镁合为一个球体, 并且氧化物为疏松状, 表观密度与液态镁的密度相同. 颗粒达到沸点之后, 由于汽化的缘故, 颗粒直径不断减小, 直至液态镁耗尽.

2) 颗粒能量方程

着火阶段, 镁颗粒只有表面反应

$$\frac{4}{3}\pi R_{\mathrm{p}}^3\rho_{\mathrm{p}}c_{\mathrm{p}}\frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}=Q_{\mathrm{hete}}+Q_{\mathrm{conv}}+Q_{\mathrm{rad}}, \tag{7}$$

其中, 熔化阶段, 认为只有表面反应, 镁颗粒的温度保持在熔点

$$\dot{m}_{\mathrm{fus}}\Delta h_{\mathrm{fus}}=Q_{\mathrm{hete}}+Q_{\mathrm{conv}}+Q_{\mathrm{rad}}.$$

燃烧阶段, 气相反应与表面反应并存, 颗粒相的温度保持在沸点

$$\dot{m}_{\mathrm{vap}}\Delta h_{\mathrm{vap}} = Q_{\mathrm{hete}} + Q_{\mathrm{conv}} + Q_{\mathrm{rad}},$$

其中, $\dot{m}_{\mathrm{fus}}$ 为单个镁颗粒熔化速率 (kg/s); Δh_{fus} 为镁的熔化焓; Δh_{vap} 为镁的汽化焓; $Q_{\mathrm{hete}} = \beta \cdot q \cdot 4\pi r_{\mathrm{p}}^2 \cdot \omega_{\mathrm{hete}}$ 为表面反应释放的热量; q 为表面反应的燃烧热 (J/kg), 该值与反应物和生成物的温度都有关; $Q_{\mathrm{conv}} = A_{\mathrm{p}} h(T_{\mathrm{g}} - T_{\mathrm{p}})$ 为颗粒与气相对流换热, A_{p} 为镁颗粒表面积, 换热系数 $h = Nu \cdot \lambda / d_{\mathrm{p}}$, λ 为气相导热系数, 颗粒相与气相没有相对运动, $Nu = 2$; $Q_{\mathrm{rad}} = A_{\mathrm{p}}\varepsilon\sigma_0(T_{\mathrm{B}}^4 - T_{\mathrm{p}}^4)$ 为辐射换热.

3.3 状态方程

$$P = \rho_{\mathrm{g}} R_{\mathrm{M}} T_{\mathrm{g}} = \mathrm{const},$$

可得

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}\rho_{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}t} R_{\mathrm{M}} T_{\mathrm{g}} + \frac{\mathrm{d}R_{\mathrm{M}}}{\mathrm{d}t}\rho_{\mathrm{g}} T_{\mathrm{g}} + \frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}t}\rho_{\mathrm{g}} R_{\mathrm{M}} = 0, \tag{8}$$

其中, $R_{\mathrm{M}} = R \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{Y_i}{M_i}$, $i = \mathrm{O_2}, \mathrm{N_2}, \mathrm{Mg}, \mathrm{MgO}$. M 为摩尔质量.

3.4 镁化学反应动力学

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 等 [32] 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, 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 1) Semenov 判据, 2) 设定着火温度, 3) 闪光法, 4) 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 [33] 中提到镁的着火温度多在 600—630 °C 之间, 樊建锋等 [34] 通过多次实验确定在 885 K 时镁的温度发生突跃, 陈萍等 [35] 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 [36] 中的活化能 $\tilde{E} = 45120$ cal/mol (1 cal = 4.184 J). 关于镁和空气的气相反应, Kashireninov 等 [37] 给出指前因子和活化能分别为 $k_0 = 1.5 \times 10^8$ m^3/mol·s, $E = 71090$ J/mol. 本模型中具体的化学反应速率如表 1 所示.

表 1 不同阶段化学反应速率

	化学反应氧气消耗速率 (kg·m^{-2}·s^{-1} 或 kg·m^{-3}·s^{-1})
缓慢氧化阶段 (< 873 K)	$\omega_{\mathrm{hete1}} = 1.7 \times 10^{12}(\rho Y_{\mathrm{O,s}})^{0.5}\exp(-34000/T_{\mathrm{p}})$ [32]
中温过渡阶段 (873 K—923 K)	$\tilde{\omega}_{\mathrm{hete}} = 8.6 \times 10^8 \rho Y_{\mathrm{O,s}}\exp(-188908/RT_{\mathrm{p}})$ [36]
高温氧化阶段 (923 K—T_{boil})	$\omega_{\mathrm{hete2}} = 1.7 \times 10^{12}(\rho Y_{\mathrm{O,s}})^{0.5}\exp(-15000/T_{\mathrm{p}})$ [32]
气相反应 (> T_{boil})	$\omega_{\mathrm{homo}} = 1.5 \times 10^8 \exp(-71090/RT)(\rho^2/M_{\mathrm{Mg}})Y_{\mathrm{O_2}}Y_{\mathrm{Mg}}$ [37]

3.5 初值条件、边界条件和算法

颗粒在颗粒群内均匀分布, 颗粒群外无颗粒.

当 $t = 0$ 时, $r < R_{\mathrm{c}}$ 时,

$Y_{\mathrm{O2}} = Y_{\mathrm{O2,0}}$, $Y_{\mathrm{Mg}} = Y_{\mathrm{MgO}} = \rho_{\mathrm{powd}} = 0$, $T_{\mathrm{g}} = T_{\mathrm{p}} = T_0$,

$r > R_{\mathrm{c}}$ 时,

$Y_{\mathrm{O2}} = Y_{\mathrm{O2,\infty}}$, $Y_{\mathrm{Mg}} = Y_{\mathrm{MgO}} = \rho_{\mathrm{powd}} = 0$, $T_{\mathrm{g}} = T_{\infty}$,

当 $t = \tau$ 时, 在 $r = 0$ 处,

$$\frac{\partial Y_i}{\partial r} = \frac{\partial T_{\mathrm{g}}}{\partial r} = \frac{\partial \rho_{\mathrm{powd}}}{\partial r} = u = 0,$$

在 $r = \infty$ 处,

$$Y_i = Y_{i,\infty}, \quad \rho_{\mathrm{powd}} = \rho_{\mathrm{powd},\infty} = 0, \quad T_{\mathrm{g}} = T_{\infty}.$$

方程 (1)—(8) 中, $\rho_{\mathrm{g}}, \rho_{\mathrm{powd}}, u, Y_i, T_{\mathrm{g}}$ 相互耦合, 仅能数值求解, 网格划分如图 2 所示, 采用了 152 个网格, 其中颗粒群占用了 46 个, 在颗粒群边界附近网格加密, 颗粒群边界网格步长为 10^{-4} m, 向颗粒群内外两侧以比例 $k = 1.004$ 等比增大. 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做为基本工况参数, 如表 2 所示.

表 2 基准工况数据

颗粒群半径 R_c/ cm	0.5	颗粒群中气相初温 $T_{g,0}$/K	673
颗粒群中颗粒相初温 $T_{p,0}$/K	673	初始颗粒半径 $r_{p,0}$/μm	30
颗粒浓度 μ/(kg/kg(Mg/air)	1	气相初始氧质量分数 $Y_{O2,0}$	0.232
辐射源温度 T_B/K	1600	环境气相温度 T_∞/K	1100
传质系数 ρD/(kg/m·s)	5×10^{-5}	环境压力 P/Pa	3.03×10^5
固态镁密度 $\rho_{p(s)}$/(kg/m^3)	1738	镁的黑度 ε	0.8
液态镁密度 $\rho_{p(l)}$/(kg/m^3)	1580	尘埃的扩散系数 D_{powd}/(m^2/s)	1×10^{-4}

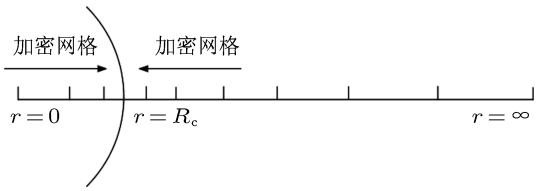

图 2 计算网格的划分

4 计算结果及讨论

4.1 颗粒群的着火燃烧过程

金属颗粒群的着火燃烧是一个复杂的过程, 不但受颗粒相温度的控制, 还受群中氧含量的控制. Annamalai 等 [16] 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 [38] 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. 他们的着火判据都着眼于颗粒本身, 且默认了环境中氧气比较充裕, 本文结合颗粒群的特点, 提出三种不同的着火: 1) 颗粒群内颗粒的着火, 2) 颗粒群的着火, 3) 颗粒群中某一位置的着火. 定义颗粒群内颗粒的着火如下: 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且其周围氧含量不为 0 时才认为着火成功, 如果颗粒相温度不能达到沸点, 或颗粒相温度虽达到沸点但其周围氧含量为 0 则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. 定义颗粒群着火如下: 颗粒群中出现火焰且火焰可自维持燃烧或可传播时, 认为颗粒群实现着火. 着火时间为颗粒群开始受热到首次出现可自维持燃烧或可传播的火焰所经历的时间. 定义颗粒群中某一位置的着火如下: 在该位置出现火焰则认为颗粒群中该位置实现着火. 着火时间为颗粒群开始受热到该位置出现火焰所经历的时间. 由以上定义可知, 颗粒群着火、颗粒群中颗粒的着火及颗粒群中某一位置着火含义并不相同, 颗粒群着火时, 颗粒群中颗粒未必着火, 而颗粒群中颗粒熄火不代表颗粒群熄火. 颗粒群着火一定代表颗粒群中某一位置着火, 反之不成立; 颗粒群中某一位置熄火不代表颗粒群熄火, 而颗粒群熄火则代表颗粒群中任何位置都熄火.

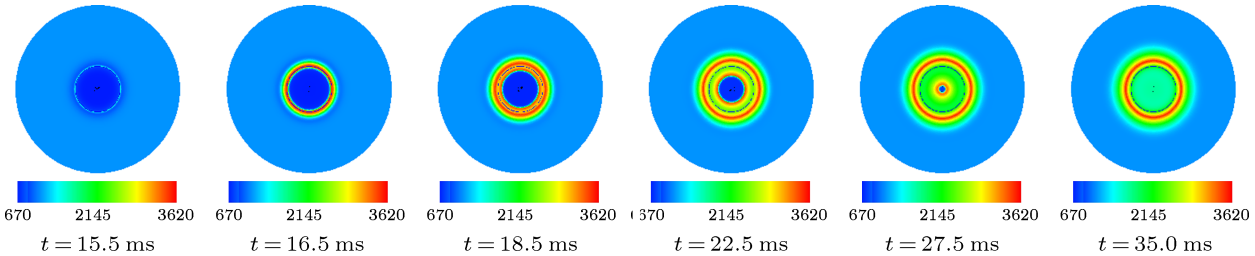

图 3 颗粒群着火和燃烧过程中气相温度变化示意图

图 3 为基准工况下颗粒群及周围气相温度随时间变化示意图 (图中黑色细实线为颗粒群边界). 图 4 为不同时刻颗粒群及周围气相温度空间分布图. 由图 3 和图 4 可以直观看出, 11.5ms 之前颗粒群内部气相温度平缓上升, 大概 15.5 ms 时气相温度出现局部峰值, 而颗粒群着火首先发生在颗粒群的边界处, 16.5 ms 左右时出现第一次明显的火焰, 随后高温火焰迅速扩散开来, 很快火焰峰范围达到

最宽, 位置位于颗粒群边界附近. 18.5 ms 左右, 火焰开始分离成两个, 一个向颗粒群内部传播, 一个向颗粒群外围传播, 在 22.5 ms 时刻明显看出火焰已在颗粒群内部和外部形成两个峰值. 内火焰峰迅速向颗粒群内部传播, 在 27.5 ms 时基本传播至颗粒群中心, 而外火焰位置变化则很小. 最后, 颗粒群燃烧趋于稳定, 内部火焰消失, 颗粒群内部气相温度也有所下降, 仅剩下外部火焰维持并控制着颗粒群的燃烧. 本模型计算所得镁颗粒群燃烧的火焰温度约为 3500 K, 与文献中所述火焰温度 3273—3373 K[39] 比较接近, 计算值略高于实验值是因为本模型中未考虑气相及 MgO“尘埃” 热辐射所致. 本模型还发现了镁颗粒群 “双火焰峰” 的燃烧现象, 关于这一性质, 前人在研究镁粉燃烧中不曾提及, 但 Du 等 [25] 在研究柱状煤粉气流燃烧过程中却发现了 “双火焰峰” 的现象. 可以认为, 燃烧过程中出现 “双火焰峰” 是单颗粒燃烧所不具有的, 是颗粒群燃烧的特有性质, 是颗粒之间争夺氧量、热量的具体呈现. 根据本模型还可求出内火焰在颗粒群中的传播速度, 其值大约为 0.4 m/s, 而 Edward 等 [26,27] 在微重力条件方形燃烧室内镁粉尘燃烧实验 (镁颗粒直径: 165—300 μm, 颗粒浓度: 1.4—3.2 g/L, 颗粒准静止, 速度: 0.06—0.14 m/s) 中测得火焰在镁粉尘云中的传播速度为 0.15—0.4 m/s, 速度差异是颗粒粒径大小和颗粒浓度不同导致, 数值模拟结果与实验结果良好地符合说明本模型是正确的.

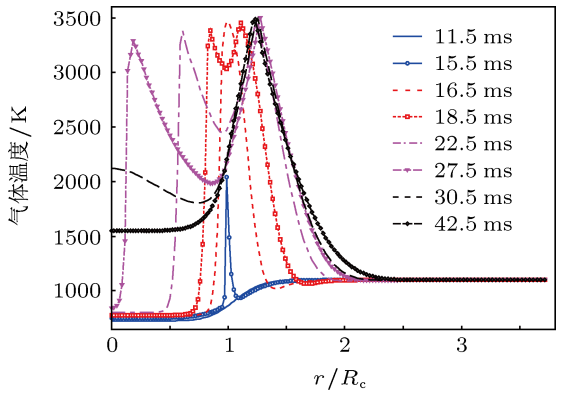

图 4 颗粒群着火和燃烧过程中气相温度的空间分布

图 5 为颗粒群在着火和燃烧的不同时刻, 颗粒相温度、气相温度及物质组分含量的空间分布图. 由图 5(a) 可以看出, 在 16.5 ms 时刻, 颗粒群边界 ($r = R_c$) 附近, 镁颗粒达到了沸点, 氧气含量出现了谷值, 气相及凝相 MgO 出现局部峰值, 但气相 Mg 含量约为 0, 气相温度出现峰值. 这是因为镁颗粒汽化后与氧气迅速反应释放热量, 使气相温度升高, 氧含量下降, 反应产物 (MgO) 含量升高; 但汽化的镁蒸气还较少, 氧气含量相对较充足, 气态镁很快消耗, 所以其含量仍为 0. 图 5(b) 可以看出, 在 18.5 ms 时刻, 气相温度出现了两个火焰峰, 气相和凝相 MgO 含量也出现了两个峰值, 氧气质量分数在较大范围出现低谷, 且谷值为 0, 其谷值位置相应出现气相温度、气相和凝相 MgO 的局部谷值, 而气相镁含量出现了局部峰值. 这是因为, 更多镁颗粒达到了沸点, 镁蒸气含量逐渐增多, 而氧含量谷值处的氧消耗殆尽, 使该位置不能发生化学反应产生热量, 镁蒸气向两侧扩散与两侧的氧气反应放出热量, 因此, 两侧形成了火焰峰而中间则变为了局部谷值. 氧含量谷值位置氧气质量分数为 0, 但气相温度仍远高于镁颗粒沸点, 因此此位置处镁颗粒已熄火, 仅处于纯蒸发状态, 蒸发出的镁蒸气温度较低也是导致出现温度局部谷值的一个原因. 由图 5(c) 可知, 18.5 ms 之后, 内火焰迅速向颗粒群内部传播, 在 27.5 ms 时刻, 内火焰已传播至接近颗粒群中心位置, 外火焰位置基本不变化, 整个颗粒群仅剩中心附近镁颗粒未达到沸点, 氧气质量分数谷值为 0 的范围进一步扩大, 而相应气相镁的质量分数上升, 气相温度局部谷值继续降低, 气相氧化镁含量曲线变化趋势与气相温度变化趋势相仿. 这说明, 内部火焰向颗粒群内部传播迅速, 火焰急剧加热了颗粒, 很短时间内使其着火燃烧, 剧烈的反应也使颗粒群内部的氧气消耗极快, 氧气浓度急剧下降的同时伴随着颗粒群内部气温的急剧升高. 图 5(d) 表示内火焰峰消失, 颗粒群趋于稳定的燃烧状态. 内部火焰由于颗粒群内部氧气的耗尽已经消失, 整个颗粒群的燃烧表现为气相镁的扩散燃烧, 外部火焰峰的位置在颗粒群外, 而颗粒群内部的颗粒已经熄火, 只处于蒸发状态, 外部火焰维持并控制着颗粒群的燃烧.

图 6 表示在颗粒群三个不同位置处气相和颗粒相温度随时间的变化曲线. 由图中可以看出, 1) 颗粒群边界处 ($r = R_c$) 的颗粒先实现着火和燃烧, 过约 5 ms 后 $r = 2/3R_c$ 处的颗粒着火, 又过 8 ms 左右颗粒群中心位置颗粒实现着火. 这说明, 火焰在沿径向向颗粒群内部传播过程中, 开始阶段传播速度比后期传播速度要慢, 这是因为开始阶段火焰在靠近颗粒群边界附近传播, 部分燃烧热量会向颗粒群外围扩散, 而后期阶段火焰在颗粒群内部传播,

燃烧热量向颗粒群外围损失少, 大部分用来加热内部颗粒群, 由此火焰传播比开始阶段要快. 2) 颗粒在着火前温度高于气相温度 (颗粒群边界附近例外). 这是因为镁颗粒不同于煤粉和液滴颗粒, 其在着火前只发生表面反应, 而没有挥发份析出, 所以在着火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, 所以颗粒相温度总高于气相温度. 而在 $r = R_c$ 处开始阶段气相温度高于颗

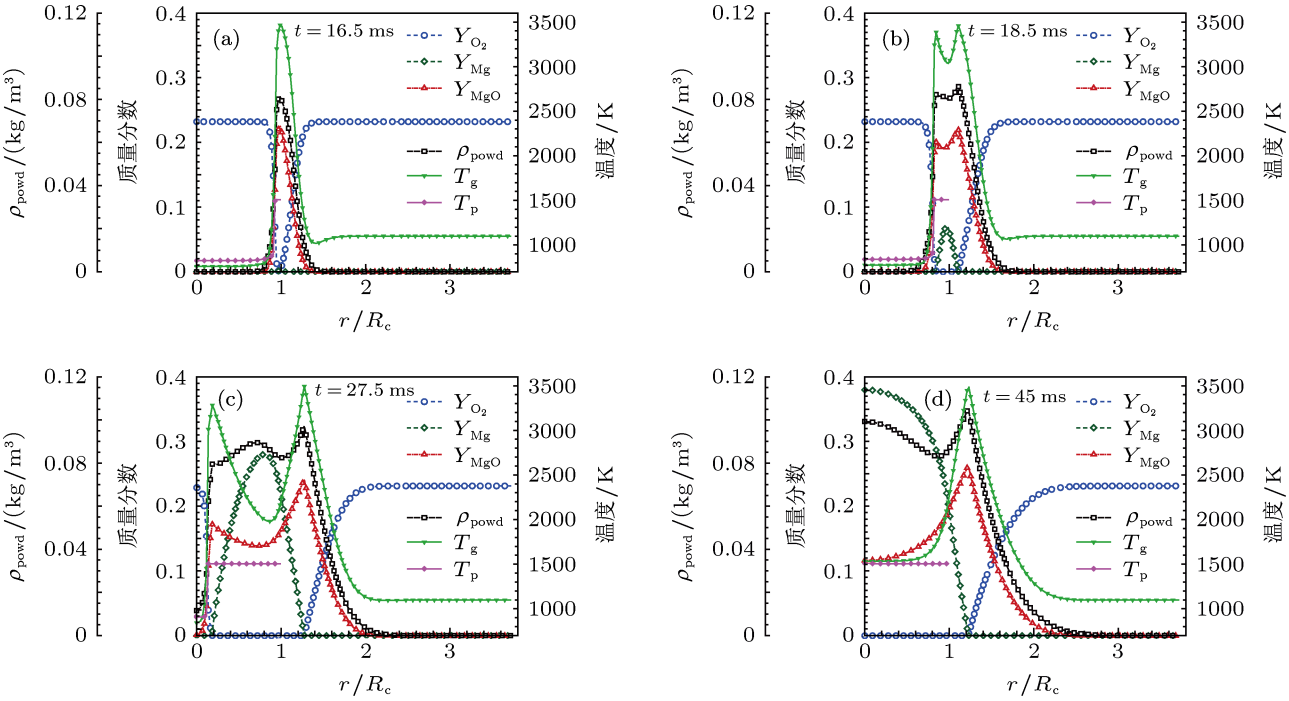

图 5 不同时刻, 颗粒群及周围气体的温度和组分空间分布 (a) $t = 16.5$ ms; (b) $t = 18.5$ ms; (c) $t = 27.5$ ms; (d) $t = 45$ ms

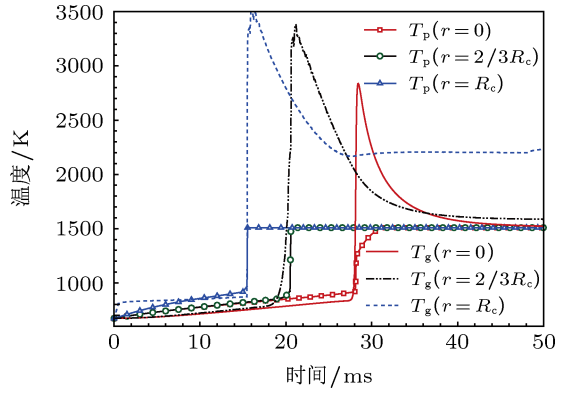

图 6 颗粒群不同位置气相和颗粒相温度随时间变化曲线

粒相温度, 这仅是由于低温的颗粒群突然进入高温气体环境而使颗粒群边界气相首先受热所致. 3) 三个不同位置达到的最大气相温度值大小不同, $r = R_c$ 处达到的最大气相温度值最高, $r = 2/3R_c$ 次之, $r = 0$ 处最小, 从图 4 和图 5 中也可以看出来, 内火焰在向颗粒群内部传播的过程中其峰值是逐渐减小的. Du 等 [25] 和 Zhao 等 [30] 在对柱状和球状煤粉尘云燃烧的研究中, 也发现了内火焰向颗粒群内部传播的过程中其火焰峰值逐渐降低, 但均未给出详细解释. 本文认为, 在火焰向颗粒群内部传播的过程中, 由于已燃颗粒群对未燃颗粒群氧量的争夺, 火焰前缘未燃颗粒群中的含氧量会越来越少, 而已燃颗粒群中镁颗粒蒸发及气相镁扩散的缘故, 火焰前缘处气相镁的含量会越来越多, 进而使气相镁和氧气越来越远离其化学反应当量比, 所以使火焰温度降低. 4) 三个不同位置处的气相温度在最后趋于稳定时大小不同, $r = R_c$ 处温度最高, $r = 2/3R_c$ 次之, $r = 0$ 处最小, 这是容易理解的, 结合图 3 图 4 可知, 颗粒群趋于稳定燃烧状态时只有外部火焰维持并控制着颗粒群的燃烧, 且峰值位置位于颗粒群边界外, 颗粒群内部氧气含量为 0, 颗粒已熄火, 仅处于纯蒸发状态, 所以离火焰峰越近的地方, 气温越高, 越远离火焰峰的位置气温越低, $r = 0$ 处气温最低且接近镁的沸点. 5) $r = 2/3R_c$ 处气相温度先于颗粒相温度发生突跃, 这是因为, 颗粒群已实现着火, 气相镁在此处颗粒着火前已扩散至此处与空气发生剧烈的均相反应, 所以气相温度先于颗粒相温度发生突跃.

4.2 颗粒浓度的影响

图 7 为颗粒浓度对颗粒群着火和燃烧的影响 (图中 $\tau_{\rm ign}$, $v_{\rm flam}$, $R_{\rm flam}$ 分别代表颗粒群着火时间, 内火焰传播速度, 燃烧稳定后火焰球半径, 下同), 图 8 为不同颗粒浓度, 颗粒群中各位置的着火时间曲线. 由图 7 图 8 可以看出, 随颗粒浓度的增加, 颗粒群的着火时间略有增加, 但火焰向颗粒群内部传播的速度加快, 颗粒群内部反而更早着火, 最后稳定燃烧时的火焰球尺寸也更大. Daisuke 等 [20,21] 通过微重力实验研究颗粒在三维特殊几何分布下的燃烧特性, 发现随颗粒间距减小, 燃烧区达到最大值的时间将延长, 且燃烧区的膨胀率将增加. 这与本模型所得的结论是一致的. 分析如下, 随颗粒浓度增大, 颗粒群的体积热容增大, 升温所需热量增多, 着火前升温速率变慢, 所以颗粒群的着火时间会有所增加. 而颗粒浓度大, 产生的气态镁也相应较多, 所以稳定燃烧时火焰球尺寸更大. 由图 8 可知, 颗粒群边界处最先着火, 颗粒群内部总是晚于外部着火, 这是因为颗粒群突然进入高温气相环境后, 边界处的气体和颗粒最先与气相环境对流换热, 所以升温速率较快, 首先实现着火. 由图 7 图 8 还可看出, 颗粒浓度大, 颗粒群着火时间长, 但火焰向内部传播速度快, 颗粒群内部着火时间反而短. 在 $r = R_{\rm c}$ 处颗粒浓度越大, 着火时间越长; 但随着火焰向内部传播, 这种差异在逐渐缩小, 不同颗粒浓度在 $r = 0.45R_{\rm c}$ 处着火时间已大致相同; 火焰继续向内部传播, 着火时间的差异已经颠倒, 在 $r = 0$ 处已经变为颗粒浓度越大, 着火时间越短. 这是因为颗粒群着火首先发生在颗粒群边界处, 而边界处颗粒群升温主要是由气相环境传热决定的, 所以颗粒浓度越大, 颗粒群体积热容越大, 颗粒群着火时间反而更长. 但当颗粒群的火焰建立起来之后, 未燃颗粒群的升温则由火焰传热和镁颗粒氧化放热共同控制. 由文献 [31] 中分析, 颗粒群中颗粒的着火时间主要消耗在缓慢氧化阶段, 而颗粒群浓度越大, 越有利于群中颗粒着火, 这是颗粒群本身的特性. 所以大浓度颗粒群体积热容大对着火的滞后作用在火焰向内传播过程中逐渐减弱, 最终表现为火焰传播速度更快, 颗粒群内部着火时间更短. 由图 8 还可知, 当颗粒浓度 $\mu = 2$ 时, 颗粒群中各位置的着火时间曲线出现了一段平台区 (如图中虚线所圈), 这是因为颗粒群浓度大易于着火, 在内火焰尚未传播到颗粒群内部之时, 辐射源及颗粒自身表面反应放热已将内部的颗粒点燃, 颗粒群在内部一定区域内同时着火, 在曲线上就呈现为一段平台区. 这也说明了, 颗粒群的着火燃烧受辐射加热, 颗粒表面氧化反应, 火焰加热等耦合控制, 是一个复杂过程, 进一步表明颗粒群的着火燃烧不是单个颗粒燃烧的简单叠加.

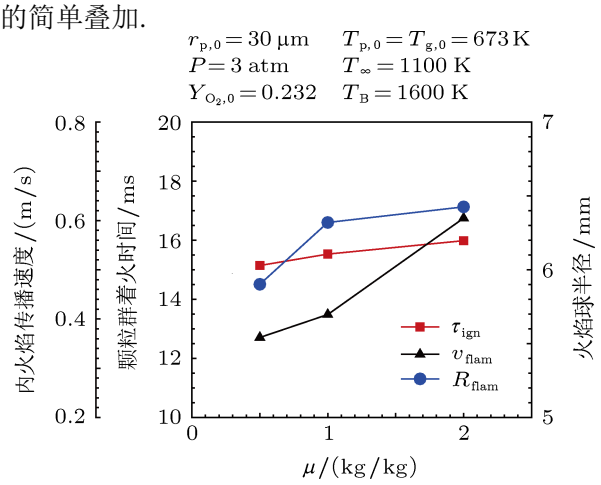

图 7 μ 对颗粒群着火和燃烧的影响 (1 atm = 1.01325×10^5 Pa)

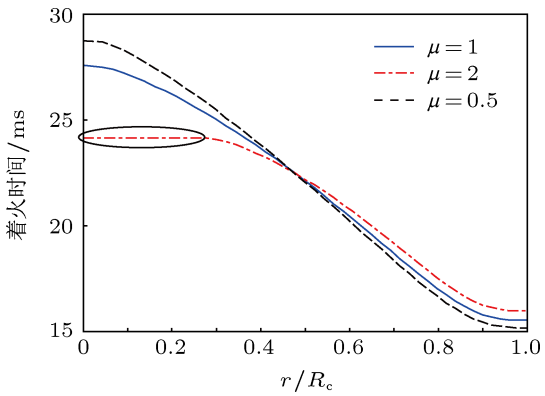

图 8 μ 不同, 颗粒群中各位置着火时间曲线

4.3 颗粒初始半径的影响

图 9 为颗粒初始粒径对颗粒群着火和燃烧的影响. 图 10 为不同颗粒初始粒径, 颗粒群中各位置的着火时间曲线. 由图 9 图 10 可知, 颗粒粒径越小, 颗粒群着火时间越短, 火焰向颗粒群内部传播速度越快, 稳定燃烧时火焰球尺寸越大. Shoshin 等 [40] 通过常温常压条件下向上喷射雾状镁粉尘的燃烧试验研究发现, 使用 −325 mesh(粒径 44 μm 以下) 镁粉时火焰传播速度为 0.75 m/s, 而使用 −400 mesh(粒径 30 μm 以下) 镁粉时火焰传播速度增大为 1 m/s; Daisuke 等 [20,21] 也通过实验发现, 随颗粒粒径的增大, 燃烧区达到最大值的时间将延长, 以上实验结果均与本文结论一致. 在煤粉

工业及粉尘爆炸等领域也普遍认为颗粒粒径越小, 颗粒群的着火和燃烧速度越快. 这是容易理解的, 颗粒越小, 比表面积越大, 其他条件都不变的情况下, 对流换热、辐射换热与表面反应释放的热量越大, 颗粒的升温速度越快, 所以着火时间更短, 火焰传播速度更快. 也由于小颗粒的对流换热和辐射受热比表面积更大, 所以镁蒸发速率更快, 相应稳定燃烧时颗粒群火焰球的尺寸也更大.

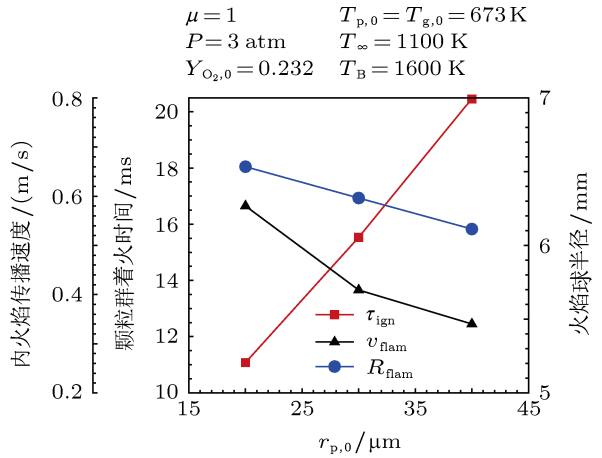

图 9 r_{p0} 对颗粒群着火和燃烧的影响

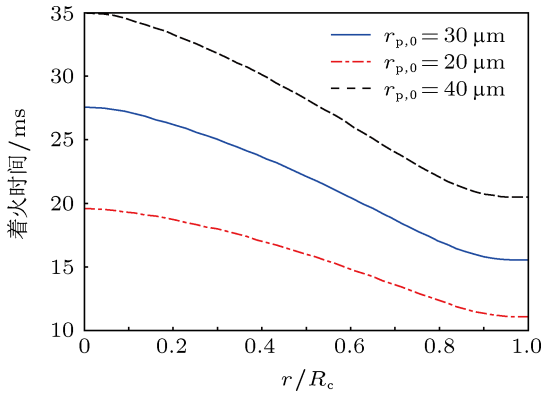

图 10 r_{p0} 不同, 颗粒群中各位置着火时间曲线

4.4 颗粒群初温的影响

图 11 为颗粒群内气相、颗粒相初温对颗粒群着火和燃烧的影响. 图 12 为颗粒群内气相、颗粒相初温不同, 颗粒群中各位置的着火时间曲线. 由图 11 可以看出, 随颗粒群初温的升高, 颗粒群着火时间变短, 火焰传播速度加快, 而稳定燃烧时火焰球尺寸变化很小. 因为文献 [31] 中得出, 镁在着火前没有挥发份析出, 其着火所耗费时间主要集中在缓慢氧化阶段, 表面反应加剧之后由于反应放热量大, 镁颗粒升温势头一般很迅速, 很短时间内就可实现着火. 所以提高颗粒群中气相、颗粒相初温实际上是直接缩短了其缓慢氧化阶段的时间, 进而缩短了颗粒群的着火时间. 同理, 颗粒群初温高, 火焰向内部传播速度也会加快. 而进入稳定燃烧阶段后, 颗粒群初温的差异已被 “弥补”, 所以火焰球尺寸与颗粒群初温的关系不大. 由图 12 还可看出, 当颗粒群初温为 773K 时, 颗粒群中各位置的着火时间曲线出现了一段平台区 (如图中所圈), 这是因为颗粒群初温高时, 颗粒在辐射和自身表面氧化的作用下在较短时间内实现着火, 在火焰尚未传播到颗粒群内部之时, 颗粒群内部已实现着火, 所以在曲线上呈现一段平台区.

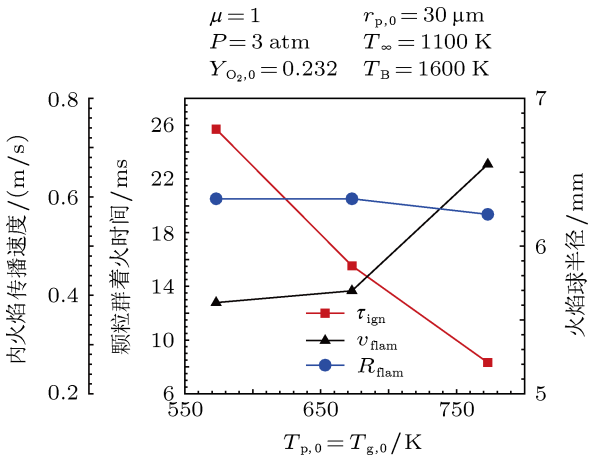

图 11 T_{p0} T_{g0} 对颗粒群着火和燃烧的影响

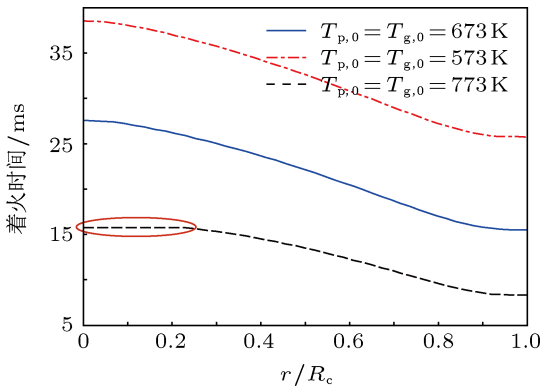

图 12 T_{p0} T_{g0} 不同, 颗粒群中各位置着火时间曲线

4.5 环境温度的影响

图 13 为环境温度对颗粒群着火和燃烧的影响. 图 14 为环境温度不同, 颗粒群中各位置的着火时间曲线. 由图 13 图 14 可知, 环境气体温度越高, 颗粒群的着火时间越短, 火焰向颗粒群内部传播的速度越慢, 达到稳定燃烧时的火焰球尺寸大小基本相同. 这是因为, 环境温度对颗粒群边界附近着火的

影响很大, 环境温度高则能迅速使颗粒群边界附近的混合物温度上升, 进而很短时间内使边界附近的颗粒实现着火; 但对颗粒群内部着火的影响将沿径向向内逐渐减小, 这是因为颗粒群内部的颗粒主要由火焰和辐射源加热, 环境温度对内部颗粒的加热作用为次要因素. 环境温度低的情况下, 颗粒群边界处着火时间较长, 使颗粒群内部颗粒及气体在辐射和颗粒表面反应放热共同作用下 “积蓄” 了更多的能量, 有更高的温度, 更加有利于火焰的传播. 所以颗粒群在高温环境中边界处先着火, 着火时间很短, 但火焰向内部传播的过程中速度并不快; 而颗粒群在较低温环境中着火时间较长, 但火焰向内部传播过程中速度较快. 由图 14 中就可看出, 三条曲线右边差距大, 而左边差距小, 也即是说, 环境温度越高, $r = R_c$ 处颗粒群着火时间越短, 但随着火焰向内传播, 这种差异在缩小. 但总的来看, 即便颗粒群处于高温环境中火焰向内部传播速度较慢, 其内部位置的着火时间还是比处于低温环境中的颗粒群相同位置的着火时间要短. 颗粒群稳定燃烧时, 环境温度对颗粒群的影响很小, 既不影响颗粒蒸发也不影响气相组分, 所以颗粒群的火焰球尺寸受环境温度影响很小. 图 14 中可以看到 $T_\infty = 900$ K 曲线有一段平台区, 这是由于在环境温度较低的情况下, 辐射源先于火焰传播到达之前将颗粒群内部颗粒点燃.

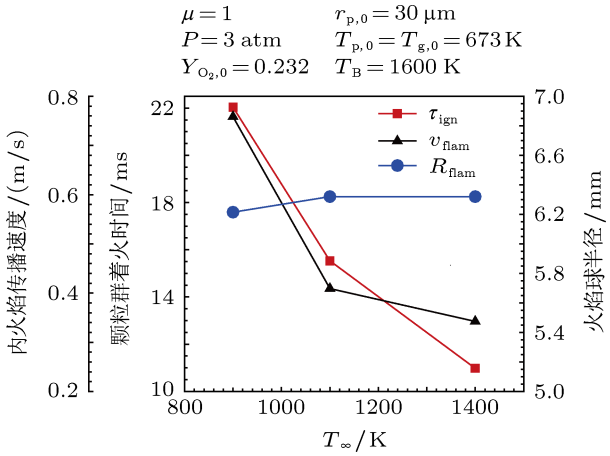

图 13 T_∞ 对颗粒群着火和燃烧的影响

4.6 辐射源温度的影响

图 15 为辐射源温度对颗粒群着火和燃烧的影响. 图 16 为辐射源温度不同, 颗粒群中各位置的着火时间曲线. 可以看出, 辐射源温度越高, 颗粒群着火时间越短, 火焰向内传播速度越快, 而稳定燃烧时火焰球尺寸越大. 此结论在日常生活, 工业生产,

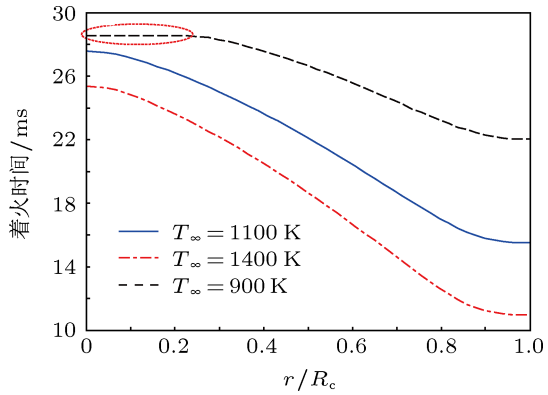

图 14 T_∞ 不同, 颗粒群中各位置着火时间曲线

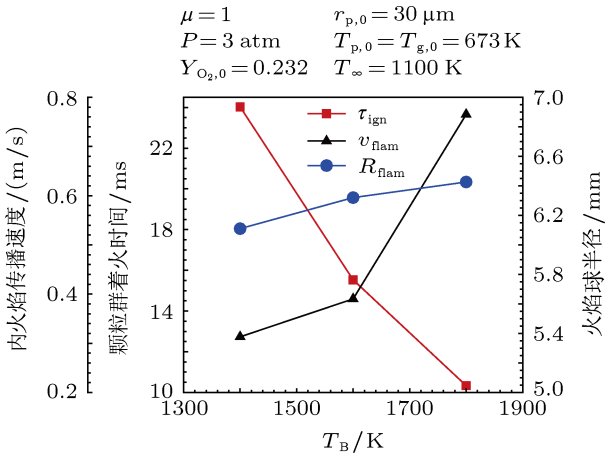

图 15 T_B 对颗粒群着火和燃烧的影响

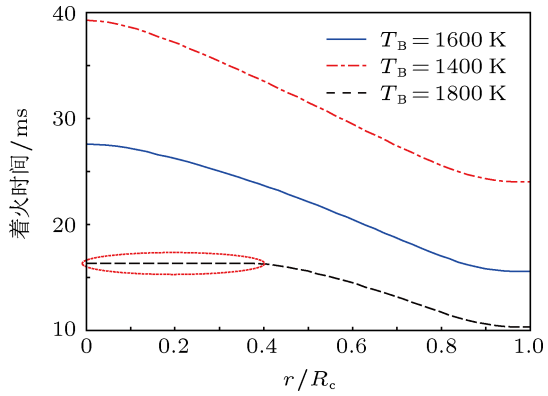

图 16 T_B 不同, 颗粒群中各位置着火时间曲线

粉尘爆炸等领域被广泛认可. 这是容易理解的, 辐射源温度越高, 辐射加热就越快, 因为辐射换热量与辐射源温度的四次方成正比, 所以提高辐射源温度是加快颗粒群着火的有效途径. 内部颗粒群未着

火之前, 主要靠辐射源和自身表面氧化反应加热, 而辐射源温度高, 辐射加热颗粒速度快, 颗粒温度也相应较高, 有利于着火, 所以火焰传播速度也比较快. 进入稳定燃烧阶段, 辐射源温度高则颗粒受辐射能量较多, 蒸发速率也较快, 所以火焰球尺寸比较大. 图 16 中可以看到 $T_{\mathrm{B}} = 1800$ K 曲线有一段平台区, 这是因为辐射源温度高的情况下, 颗粒群内部颗粒在先于火焰传播到达之前被辐射源点燃.

5 结 论

本文建立了一维非稳态球形镁颗粒群着火燃烧模型, 数值模拟了镁颗粒群的着火燃烧过程, 获得了着火的发生和颗粒群火焰的变化过程. 研究表明, 颗粒群着火首先发生在颗粒群边界, 随后初始的燃烧火焰会分离, 一个向颗粒群内部传播, 一个向外部传播, 最终由于氧气的耗尽内部火焰将消失, 外部火焰维持并控制着整个颗粒群的燃烧. 火焰向内部传播过程中, 传播速度会逐渐加快, 且火焰峰温度值呈逐渐降低趋势. 颗粒群最终燃烧稳定时表现为气相镁的扩散燃烧, 颗粒群内部的颗粒已经熄火, 只处于蒸发状态, 外部火焰维持并控制着颗粒群的燃烧.

随颗粒浓度的增大, 颗粒群着火时间略有增长, 但火焰传播速度更快, 着火反而变得容易, 燃烧稳定时火焰球尺寸也较大. 颗粒粒径对颗粒群着火燃烧的影响明显, 粒径越小, 颗粒群着火时间越短, 火焰传播速度也越快, 燃烧稳定时火焰球尺寸较大, 选取小粒径颗粒将显著提高颗粒群的着火燃烧性能. 颗粒群初温越高, 颗粒群着火时间越短, 火焰传播速度也会加快, 但燃烧稳定时火焰球尺寸基本不变. 环境温度对颗粒群着火燃烧的影响较复杂, 环境温度越高, 颗粒群着火时间越短, 但火焰传播速度却越慢, 稳定燃烧时火焰球尺寸变化很小. 辐射源温度对颗粒群着火燃烧的影响较大, 辐射源温度越高, 颗粒群着火时间越短, 火焰传播速度越快, 燃烧稳定时火焰球尺寸也越大.

本模型较全面地反映了镁颗粒群着火燃烧的机理, 与实际情况相符, 并能将单颗粒着火燃烧与群体着火燃烧联系起来, 具有一定的实用价值, 可以用来指导粉末燃料冲压发动机燃烧室一、二次空燃比的设计.

[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] Krol D, Pekediz A, de Lasa H 2000 *Powder Technol* **108** 6

[3] Bai D R, Jin Y 1991 *J. Chemical Industry and Engineering (China)* **42** 697 (in Chinese) [白丁荣, 金涌 1991 化工学报 **42** 697]

[4] Liu M, Zhang H Q, Wang X L, Guo Y C, Lin W Y 2003 *Journal of Combustion Science and Technology* **9** 128 (in Chinese) [刘敏, 张会强, 王希麟, 郭印诚, 林文漪 2003 燃烧科学与技术 **9** 128]

[5] Liu C R, Guo Y C, Wang X L 2006 *J. Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.)* **46** 728 (in Chinese) [刘春嵘, 郭印诚, 王希麟 2006 清华大学学报(自然科学版) **46** 728]

[6] Shi H X, Luo Z Y, Wang Q H, Cen K F 2005 *Chinese Journal of Power Engineering* **25** 60 [石惠娴, 骆仲泱, 王勤辉, 岑可法 2005 中国动力工程学报 **25** 60]

[7] 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]

[8] 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, 骆仲泱, 李绚天 2002 高等燃烧学 (杭州: 浙江大学出版社) 第 329 页]

[9] Chiu H H, Liu T M 1977 *Combustion Science and Technology* **17** 127

[10] Chiu H H, Kim H Y, Croke E J 1982 *Nineteenth Symposium (International) on Combustion/ The Combustion Institute* Haifa, Israel, August 8–13, 1982 p971

[11] Chiu H H, Ahluwalia R K, Koh B, Croke E J 1978 *AIAA 16th Aerospace Sciences meeting* Huntsville, Alabama, January 16–18, 1978 p75

[12] Bellan J, Cuffel R 1983 *Combustion and Flame* **51** 55

[13] Bellan J, Harstad K 1990 *Combustion and Flame* **79** 272

[14] Annamalai K, Ramalingam S C 1987 *Combustion and Flame* **70** 307

[15] Annamalai K, Ryan W 1992 *Prog. Energy Combust. Sci.* **18** 221

[16] Annamalai K, Ryan W 1993 *Prog. Energy Combust. Sci.* **19** 383

[17] Annamalai K, Ryan W 1994 *Prog. Energy Combust. Sci.* **20** 487

[18] Brzustowski T A, Twardus E M, Wojcicki S, Sobiesiak A 1979 *AIAA Iournal* **17** 1234

[19] Nagata H, Kudo I, Ken'ichi, Nakamura S, Takeshita Y 2002 *Combust and Flame* **129** 392

[20] Daisuke S, Maki Y, Shinji N, Toshikazu K 2005 *Microgravity Sci. Technol.* **XVII-3** 23

[21] Daisuke S, Maki Y, Shinji N, Toshikazu K 2007 *Proceedings of the Combustion Institute* **31** 2149

[22] Masato M, Hiroshi O, Naoya K, Masao K, Yuichiro W, Shinichi Y 2005 *Combust. Flame* **141** 241

[23] Masato M, Hiroshi O, Naoya K, Yuichiro W, Masao K, Shinichi Y 2006 *Combust. Flame* **146** 391

[24] Liu X J, Li L 2009 *International Journal of Heat and Mass transfer* **52** 4785

[25] Du X Y, Gopalakrishnan C, Annamalai K 1995 *Fuel* **74** 487

[26] Edward L D, Vern K H 1999 *Combustion and Flame* **118** 262

[27] Edward L D, Vern K H 2000 *Combustion and Flame* **122** 20

[28] Sun J H, Dobashi R, Hirano T 2006 *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* **19** 135

[29] Yin Y, Sun J H, Ding Y B, Guo S, He X C 2009 *Journal of Hazardous*

Materials **170** 340
[30] Zhao Y H, Kim H Y, Yoon S S 2007 *Fuel* **86** 1102
[31] Yang J Z, Xia Z X, Hu J X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 164702 (in Chinese) [杨晋朝, 夏智勋, 胡建新 2012 物理学报 **61** 164702]
[32] Ezhovskii G K, Ozerov E S 1978 *Combustion, Explosion, and Shock Waves* **13** 716
[33] Breiter A L, Mal'tsev V M, Popov E I 1978 *Combustion, Explosion and Shock Waves* **13** 475
[34] Fan J F, Yang G C, Zhou Y H, Xu J, Zhang Z F, Shi L K 2006 *Foundry Technology* **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]
[35] Chen P, Zhang M X 2002 *Special Casting & Nonferrous Alloys-2002 Year Die-Casting Special issue* 323 (in Chinese) [陈萍, 张茂勋 2002 特种铸造及有色合金 -2002 年压铸专刊 323]
[36] Gurevich M A, Stepannov A M 1968 *Fizika Goreniya i Vzryva* **4** 189
[37] Kashireninov O E, Manelis G B 1982 *Russ. J. Phys. Chem* **56** 630
[38] Roberts T A, Burton R L, Krier H 1993 *Combust. Flame* **92** 125
[39] Edward L D, Charles H B, Edward P V 2000 *Combust. Flame* **122** 30
[40] Shoshin Y, Dreizin E 2003 *Combust. Flame* **133** 275

Numerical studies of ignition and combustion 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 28 August 2012; revised manuscript received 27 November 2012)

Abstract

A one-dimensional unsteady ignition and combustion model is established for the pulverized magnesium particles in a spherical cloud. The behavior of ignition and combustion of magnesium particle cloud is numerically simulated. The result shows that the ignition of particle cloud occurs at the boundary of particle cloud first, then the initial of which bifurcates into two flames, one of which propagates into the particle cloud, and the other moves away from it. Finally, the inner flame disappears because of O_2 depletion, and only the outer flame, which maintains and controls the combustion of magnesium particle cloud, exists at the outside of it. The flame propagation velocity accelerates, while the flame temperature decreases during the process of the inner flame going into the magnesium particle cloud. The effects of the interior and the environmental parameters on the ignition and combustion of the magnesium particle cloud were analyzed. With the increase in the particle concentration, the ignition delay time increases slightly, but the propagation velocity of the inner flame becomes faster, and the steady particle cloud flame sphere is enlarging. With increasing initial temperature of the particle cloud, the ignition delay time canbe reduced significantly, the propagation of inner flame speeds up, but the size of steady particle cloud flame sphere keeps almost constant. The effect of ambient temperature on ignition and combustion of particle cloud is complicated. The higher the ambient temperature, the shorter the ignition delay time, however, the propagation velocity of inner flame becomes slower, and the size of the steady particle cloud flame sphere changes very insignificantly. Both the size of particle and the temperature of radiation source have great influences on the ignition and combustion of particle cloud. The smaller the particle size or the higher the temperature of radiation source, the shorter the ignition delay time of particle cloud, the faster the propagation velocity of inner flame, and the bigger the size of steady flame sphere. The results of numerical simulation are in good agreement with experimental data published in the literature.

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

PACS: 47.70.−n, 47.70.pq, 82.60.cx **DOI:** 10.7498/aps.62.074701

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

† Corresponding author. E-mail: yjzhhenan@hotmail.com