

粉末燃料冲压发动机内镁粉尘云层流燃烧模型*

杨晋朝, 夏智勋, 胡建新

(国防科技大学 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:对粉末燃料冲压发动机预燃室内镁粉尘云燃烧过程进行了研究,建立了镁粉尘云的一维层流预混燃烧模型。研究表明,镁粉尘云层流火焰传播很稳定,燃烧过程中火焰结构基本不变,燃烧区很薄,而预热区厚度约是燃烧区的2~3倍。粉尘云中镁颗粒的蒸发和气相镁与氧气的均相反应是产生火焰的直接原因,也是火焰得以传播的关键。预热区气相温度升高主要靠燃烧区气体的导热和扩散过来的气相镁与氧气反应释放热量,而预热区颗粒相温度升高主要靠气相相对其对流传热。分析了各参数对粉尘云燃烧的影响,颗粒相对浓度对粉尘云燃烧的影响比较复杂,在浓度较低的情况下,增大颗粒相对浓度有利于粉尘云快速燃烧;而在浓度较高的情况下,增大颗粒相对浓度则不利于粉尘云快速燃烧。随颗粒粒径的增加,火焰传播速度减小,火焰温度升高,预热区厚度增大。火焰传播速度和火焰温度随粉尘云初温增加线性增长,预热区厚度随粉尘云初温增加抛物线增长。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;粉尘云;层流火焰;镁燃烧

中图分类号:V231.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)05-0013-07

Laminar combustion model of pulverized magnesium particle cloud in powdered fuel ramjet

YANG Jinzhao, XIA Zhixun, HU Jianxin

(Science and Technology on Scramjet Laboratory, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The combustion process of pulverized magnesium particle cloud in powdered fuel ramjet preburner was studied and a one-dimension premixed laminar combustion model of pulverized magnesium particle cloud was established. The study shows that the laminar flame propagation of pulverized magnesium particle cloud is very stable, and the flame structure is almost invariable in the combustion process; the combustion zone thickness is very thin and the preheat zone thickness is about 2-3 times as much as the former. The magnesium particles vaporization and the homogeneous reaction of magnesium vapor and oxygen in particle cloud is the direct cause of flame and the key of flame propagation that; the preheat zone gas temperature rising depends mainly on the thermal conductivity of the combustion zone and the reaction heat of magnesium vapor which diffuses from combustion zone and oxygen while the preheat zone particle temperature rise depends on the convective heat transfer from gas phase to particle phase mostly. The effects of the interior parameters on the combustion of the magnesium particle cloud were analyzed. The effect of particle relative concentration on combustion of particle cloud is complex. When the particle relative concentration is low, increasing particle relative concentration is helpful for speeding up the particle cloud combustion process; when the particle relative concentration is high, increasing particle relative concentration is adverse to speeding up the particle cloud combustion process. With the increase of the particle size, the flame propagation speed is reduced, the flame temperature increases, and the thickness of preheat zone increases as well. With the increase of the initial temperature of particle cloud, flame propagation speed and flame temperature display linear growth, and the preheat zone thickness shows parabolic growth. The tendencies obtained by numerical simulation coincide well with those of the experimental results from the previous literature.

Key words: powdered fuel ramjet; particle cloud; laminar flame; combustion of magnesium

粉末燃料冲压发动机是一种新概念冲压发动机^[1]。它使用金属粉末为燃料,冲压空气为氧化剂和工质;金属粉末经流化后进入燃烧室直接与冲压空气燃烧反应,最后燃烧产物从喷管喷出产生推力。其具体工作过程如下:粉末燃料储存在独立的储箱中,按一定的供给速率被流化气带入

预燃室内,与一次冲压空气掺混并燃烧;一次燃烧产物经预燃室出口喷入补燃室内与二次冲压空气补充燃烧,燃烧后的产物经尾喷管膨胀做功产生推力。其与传统的药柱式固体火箭冲压发动机燃烧特性有所不同,预燃室内的燃料以气固两相流的形式存在,粉末浓度较大且速度不高,所以粉末

* 收稿日期:2013-01-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51006118)

作者简介:杨晋朝(1981—),男,河南新乡人,博士研究生,E-mail:yjzhnenan@hotmail.com;

夏智勋(通信作者)男,教授,博士,博士生导师,xiazhixun@nudt.edu.cn

燃料冲压发动机预燃室内的燃烧类似于粉尘云在一维管内的层流预混燃烧。

镁金属有良好的点火和燃烧性能及高的燃烧热值,所以被广泛使用在固体推进剂中^[2];在工业生产及粉尘爆炸领域中也发现,镁粉尘云爆炸下限浓度低,最小点火能量小^[3-4]。这都预示了镁作为发动机燃料有其独特的优势,镁粉可作为粉末燃料冲压发动机的燃料。综合考虑金属燃料的燃烧热值、点火及自维持燃烧的难易程度、燃烧产物对发动机性能的影响等多方面因素,并结合现有的组织燃烧技术手段,国内多选用镁粉作为粉末燃料冲压发动机的燃料。

因为颗粒在粉末燃料冲压发动机内停留时间较短,如何尽快使颗粒实现着火并迅速燃烧完全是提高发动机燃烧效率的关键,详细了解粉尘云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。基于粉末燃料冲压发动机使用镁颗粒作为燃料并且在预燃室内颗粒浓度较大的现状,有必要对镁粉尘云燃烧过程进行研究。本文以处于管内的镁粉尘云作为研究对象,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,建立了一维非稳态镁粉尘云层流火焰传播模型。数值模拟镁粉尘云的燃烧过程,研究粉尘云火焰结构、燃烧过程等特性,并分析镁颗粒相对浓度、颗粒粒径、粉尘云初始温度等参数对粉尘云燃烧的影响。

1 模型的基本思想与假设

喷入预燃室的镁粉尘云遇到已燃产物后,受着火燃烧,其高温燃烧产物又可实现后续进入的粉尘云持续燃烧。本文所指的粉尘云是粉末燃料冲压发动机预燃室内的气固两相混合物,包括镁颗粒与气体,镁颗粒在气体中均匀分布,为球形且半径均为 r_p 。本模型考虑粉尘云处于无限长一维管内,为静止状态,粉尘云火焰由已燃区向未燃区传播,如图 1 所示。未燃粉尘云内颗粒相对浓度为 μ ,颗粒相与气相温度均为 T_0 ,在已燃产物对流换热作用下,未燃粉尘云内的镁颗粒依次升温、熔化,最后着火燃烧。本模型的主要假设如下:

(1) 镁粉尘云位于无限长管中,壁面绝热,粉尘云仅沿轴向方向各参数有变化,每个横截面中各参数相同;

(2) 镁颗粒为点源,且空间位置固定;

(3) 不考虑粉尘云火焰辐射的影响;

(4) 同一颗粒的温度各处相同;

(5) 路易斯数 $Le = 1$ 。

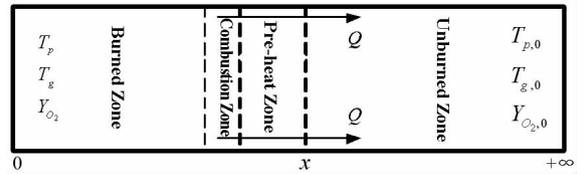


图 1 物理模型

Fig. 1 Illustration of the physical model

(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。

(8) 理想气体,全场等压、无粘性;

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

(10) 扩散系数 $D = D_0 (T/T_0)^{1.5} p_0/p, \rho D = \rho_0 D_0 (T/T_0)^{0.5}$, D_0 、 ρ_0 为气体在 p_0 、 T_0 状态下的扩散系数和密度;

(11) 不考虑重力的影响。

2 模型的基本方程

2.1 空气/镁反应机理

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: $2Mg(\text{凝}) + O_2(\text{气}) \rightarrow 2MgO(\text{固})$,为一步反应。反应速率由 Arrhenius 公式描述, $\omega_{hete} = k_0 (\rho Y_{O_2})^\nu \exp(-E/RT_s)$,其中 ω_{hete} 为表面反应氧气消耗速率,单位 $kg/(m^2 \cdot s)$, 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, R 为通用气体常数($R = 8.314J/(mol \cdot K)$)。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: $2Mg(\text{气}) + O_2(\text{气}) \rightarrow 2MgO(\text{凝/气})$,为一步反应。反应速率由 Arrhenius 公式描述, $\omega_{homo} = k_0 Y_{O_2} Y_{Mg} \exp(-E/RT) (\rho^2/M_{Mg})$,其中 ω_{homo} 为气相反应氧气消耗速率,单位 $kg/(m^3 \cdot s)$, 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两部分组成。镁和氧气的燃烧热值 q 与两者的温度及物态都有关。

2.2 气相方程

(1) 质量方程

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g u) = S_m \quad (1)$$

式中 t 、 x 、 ρ_g 、 u 分别为时间、空间距离、混合气密度和速度, S_m 为质量源项。

$$\frac{\partial \rho_{powd}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_{powd} u) = D_{powd} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \rho_{powd}}{\partial x} \right) + S_{m,powd} \quad (2)$$

本模型中认为气相反应生成的凝相 MgO 为“微小”尘埃,计算中将其作为“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。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, $S_{m,powd}$ 为 MgO 尘埃质量源项。

(2) 组分方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g Y_i) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g u Y_i) = \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g D \frac{\partial Y_i}{\partial x}) + S_i \quad (3)$$

($i = \text{O}_2, \text{N}_2, \text{Mg}, \text{MgO}$ 分别为氧气,氮气,气相镁,气相氧化镁)

式中 Y_i 为 i 组分的质量分数, S_i 为物质组分源项。

(3) 能量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_g c_g T_g) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g u c_g T_g) \\ & + \frac{\partial}{\partial t}(\rho_{powd} c_{\text{MgO}(c)} T_g) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_{powd} u c_{\text{MgO}(c)} T_g) \\ & = \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g D c_g \frac{\partial T_g}{\partial x}) + S_e \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $c_g = \sum c_i Y_i$, $i = \text{O}_2, \text{N}_2, \text{Mg}, \text{MgO}$ 为混合气的定压比热容, $c_{\text{MgO}(c)}$ 为凝相氧化镁的比热容,比热容均为温度的函数。 T_g 为混合气温度, S_e 为能量源项。

方程(1)~(4)中源项的具体表达式为

$$\begin{cases} S_m = n \dot{m}_{vap} - n \dot{m}_{\text{O}_2, \text{hete}} - \dot{m}_{\text{O}_2, \text{homo}} - \dot{m}_{\text{Mg}, \text{homo}} \\ \quad + \dot{m}_{\text{MgO}(g), \text{homo}} \\ S_{m, \text{powd}} = \dot{m}_{\text{MgO}(c), \text{homo}}, S_{\text{O}_2} = -n \dot{m}_{\text{O}_2, \text{hete}} - \dot{m}_{\text{O}_2, \text{homo}}, \\ S_{\text{N}_2} = 0, S_{\text{Mg}} = -\dot{m}_{\text{Mg}, \text{homo}} + n \dot{m}_{vap}, \\ S_{\text{MgO}} = \dot{m}_{\text{MgO}(g), \text{homo}}, \\ S_e = n h A_p (T_g - T_p) - n \dot{m}_{\text{O}_2, \text{hete}} T_g c_{\text{O}_2} + n \dot{m}_{vap} T_b c_{\text{Mg}(g)} \\ \quad - \dot{m}_{\text{O}_2, \text{homo}} T_g c_{\text{O}_2} - \dot{m}_{\text{Mg}, \text{homo}} T_g c_{\text{Mg}(g)} \\ \quad + \dot{m}_{\text{MgO}(g), \text{homo}} T_g c_{\text{MgO}(g)} + \dot{m}_{\text{MgO}(c), \text{homo}} T_g c_{\text{MgO}(c)} \\ \quad + Q_{\text{homo}} \end{cases}$$

其中, n 为粉尘云中颗粒的数密度 ($\text{particle}/\text{m}^3$), \dot{m}_{vap} 为单个镁颗粒蒸发速率 (kg/s); $\dot{m}_{\text{O}_2, \text{hete}}$ 为单个镁颗粒表面反应消耗氧气速率 (kg/s); $\dot{m}_{\text{O}_2, \text{homo}}$ 和 $\dot{m}_{\text{Mg}, \text{homo}}$ 分别为均相反应消耗氧气和气相镁速率 ($\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$); $\dot{m}_{\text{MgO}(c), \text{homo}}$ 和 $\dot{m}_{\text{MgO}(g), \text{homo}}$ 分别为均相反应生成凝相和气相氧化镁速率 ($\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$), 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, $Q_{\text{homo}} = \omega_{\text{homo}} \cdot \beta \cdot q$ ($\text{J}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$), 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_{O_2} , $c_{\text{Mg}(g)}$, $c_{\text{MgO}(g)}$ 分别为氧气、气态镁、气态氧化镁的定压比热容。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均相反应生成氧化镁尘埃的热焓。

2.3 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,而疏松氧化膜的表观密度等于凝相 Mg 的密度。

$$\rho_p \cdot 4\pi r_p^2 \frac{dr_p}{dt} = -4\pi r_p^2 \cdot \omega_{\text{hete}} \cdot \beta \quad (5)$$

$$\rho_p \cdot 4\pi R_p^2 \frac{dR_p}{dt} = 4\pi r_p^2 \cdot \omega_{\text{hete}} \quad (6)$$

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。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。

$$\frac{4}{3}\pi R_p^3 \rho_p c_p \frac{dT_p}{dt} = Q_{hete} + Q_{conv} \quad (7)$$

其中,颗粒熔化阶段,认为只有表面反应,镁颗粒的温度保持在熔点。

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

颗粒蒸发燃烧阶段,气相反应与表面反应并存,颗粒相的温度保持在沸点。

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

其中, ρ_p, c_p, T_p 分别为镁颗粒的密度、比热容和温度; \dot{m}_{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; $Q_{hete} = \beta \cdot \bar{q} \cdot 4\pi r_p^2 \cdot \omega_{hete}$ 为表面反应释放的热量; \bar{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; $Q_{conv} = A_p h (T_g - T_p)$ 为颗粒与气相对流换热, A_p 为颗粒表面积, 换热系数 $h = Nu \cdot \lambda / d_p$, λ 为气相导热系数, 颗粒相与气相相对速度很小, $Nu = 2$ 。

2.4 状态方程

气体压强 $p = \rho_g R_M T_g = const$, 可得

$$\frac{dp}{dt} = \frac{d\rho_g}{dt} R_M T_g + \frac{dR_M}{dt} \rho_g T_g + \frac{dT_g}{dt} \rho_g R_M = 0 \quad (8)$$

其中, 气体常数 $R_M = R \cdot \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{M_i}$, $i = O_2, N_2, Mg, MgO$, M_i 为第 i 种物质摩尔质量。

2.5 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^[5] 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 $E_1/R = 34000K$, 熔化后活化能为 $E_2/R = 15000K$, 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[6]中提到镁的着火温度多在 $600 \sim 630^\circ C$, 樊建锋^[7] 通过多次实验确定在 $885K$ 时镁的温度发生突跃,陈萍^[8] 也通过实验得出镁的燃点为 $602.2^\circ C$ 。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 $873K$ (固态)到 $923K$ (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[9]中的活化能 $\bar{E} = 45120cal/mol$ 。关于镁和空气的气相反应,Angel^[10] 给出指前因子和活化能分别为 $k_0 = 2.22 \times 10^6 m^3/mol \cdot s$, $E = 30500cal/mol$ 。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

Tab. 1 The rate of reaction at different stage

	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 (< 873K)	$\omega_{hete1} = 1.7 \times 10^{12} (\rho Y_{O_2,s})^{0.5} \exp(-34000/T_p)$ ^[5]
中温过渡阶段 (873K ~ 923K)	$\tilde{\omega}_{hete} = 8.6 \times 10^8 \rho Y_{O_2,s} \exp(-188908/RT_p)$ ^[9]
高温氧化阶段 (923K ~ T_{boil})	$\omega_{hete2} = 1.7 \times 10^{12} (\rho Y_{O_2,s})^{0.5} \exp(-15000/T_p)$ ^[5]
气相反应 (> T_{boil})	$\omega_{homo} = 2.22 \times 10^6 T^{0.5} \exp(-127700/RT) (\rho^2/M_{Mg}) Y_{O_2} Y_{Mg}$ ^[10]

2.6 初值条件、边界条件和算法

当 $t = 0$ 时,

$$Y_{O_2} = Y_{O_2,0}, Y_{Mg} = Y_{Mg0} = \rho_{powd} = 0, T_g = T_p = T_0$$

当 $t = \tau$ 时,

$$\text{在 } x = 0 \text{ 处, } \frac{\partial Y_i}{\partial x} = \frac{\partial T_g}{\partial x} = \frac{\partial \rho_{powd}}{\partial x} = u = 0$$

$$\text{在 } x = \infty \text{ 处, } Y_i = Y_{i,\infty},$$

$$\rho_{powd} = \rho_{powd,\infty} = 0, T_g = T_p = T_\infty = T_0$$

方程(1) ~ (8) 中, $\rho_g, \rho_{powd}, u, Y_i, T_g$ 相互耦

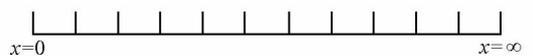


图 2 计算网格的划分

Fig. 2 Mesh schematic

合,仅能数值求解,网格划分如图 2 所示,全场网格均匀,使用交错网格、显式上风格式离散求解。时间步长取 $1 \times 10^{-8}s$ 。以接近发动机工作的数据作为基本工况参数,如表 2 所示。

表2 基准工况数据

Tab.2 Base case data

粉尘云中颗粒相初温	$T_{p,0} = 423\text{K}$	粉尘云中气相初温	$T_{g,0} = 423\text{K}$
颗粒相对浓度	$\mu = 1/3 (\approx 0.831\text{kg/m}^3)$	颗粒数密度	$n = 4.346 \times 10^9 \text{particle/m}^3$
环境压力	$p = 3.03 \times 10^5 \text{Pa}$	初始颗粒半径	$r_{p,0} = 30\mu\text{m}$
标况下传质系数	$\rho_0 D_0 = 2.7 \times 10^{-5} \text{kg/m} \cdot \text{s}$	气相初始氧质量分数	$Y_{O_2,0} = 0.232$
固态镁密度	$\rho_{p(s)} = 1738\text{kg/m}^3$	尘埃的扩散系数	$D_{\text{powd}} = 1 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$
液态镁密度	$\rho_{p(l)} = 1580\text{kg/m}^3$	镁的黑度	$\varepsilon = 0.8$

3 计算结果及讨论

3.1 粉尘云的层流燃烧过程

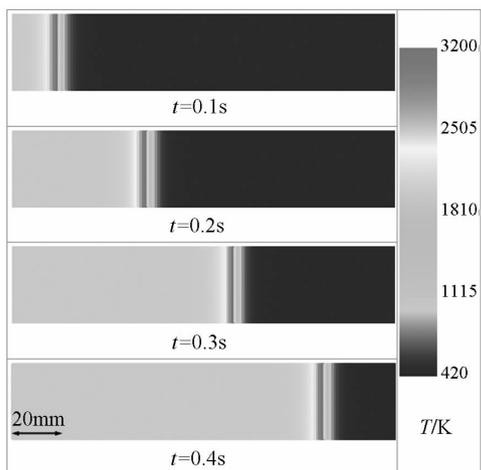


图3 粉尘云燃烧过程中气相温度变化示意图

Fig.3 Variation of gas temperature of four different times

图3为基准工况下粉尘云的燃烧过程示意图。由图中可得火焰传播速度(v_f)、火焰温度(T_f)、预热区厚度(δ)等层流燃烧的重要参数,由图可见,镁粉尘云层流火焰从左向右传播,火焰传播速度比较稳定,约为0.35m/s;粉尘云在燃烧过程中火焰结构基本不变,从燃烧波前到波后依次分为4区:未燃区,预热区,燃烧区(火焰),已燃区,且燃烧区和预热区范围基本不变,火焰温度也基本不变;燃烧区很薄,约为2mm,而预热区厚度(δ 为从火焰区/预热区边界处到气相温度为 $1.25T_{g,0}$ 处的区域宽度)约是燃烧区的2~3倍;火焰温度最高,已燃区温度低于火焰温度,稳定在某值。

取包含4个区在内的粉尘云局部区域加以分析,以便更详细地了解粉尘云的燃烧特性。图4为任一时刻镁粉尘云局部区域的气相温度分布示意图,图5为该局部区域的粉尘云温度和组分空间分布图。图5中横坐标 x^* 以火焰峰值位置为原点,火焰传播方向为正方向; m_{Mg} 表示粉尘云中某位置处单个颗粒中镁的质量,粉尘云中不同 x^*

处的 m_{Mg} 不同。由图4和图5可知,(1)在燃烧区,粉尘云气相温度最高,其峰值(即火焰温度

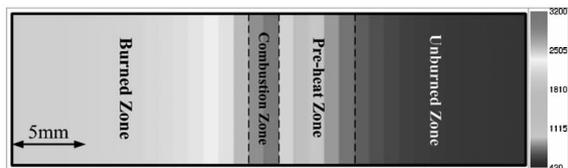


图4 粉尘云气相温度分布示意图

Fig.4 Distribution of gas temperature

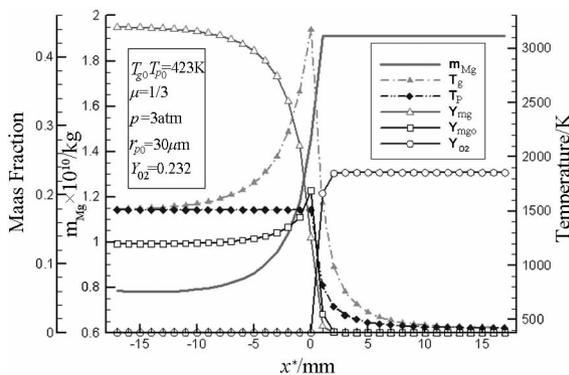


图5 粉尘云温度和组分空间分布图

Fig.5 Temperature and species distribution

T_f)约为3200K,颗粒相温度达到了沸点,气相中氧气含量接近0,气相MgO含量出现局部峰值。这是因为,镁颗粒在蒸发,蒸发的气相镁与气相中的氧反应释放大量热量,使气相温度出现峰值,并导致氧气大量消耗和反应产物(MgO)含量出现峰值,而高温气体对颗粒的传热使镁颗粒得以持续蒸发。(2)在已燃区,颗粒相温度都达到了沸点,而气相温度最终会稳定在镁的沸点左右;已燃区中的 m_{Mg} 最小而 Y_{Mg} 最高。这是因为基准工况下颗粒相对浓度比较高,气相中的氧气不足以将粉尘云中的镁全部反应完,所以燃烧波过后,气相温度仍高于颗粒相温度,镁颗粒会继续吸收气相热量并蒸发,直至气相温度与颗粒相温度相同。因而已燃区的 m_{Mg} 最小, Y_{Mg} 最大,并且气相温度会稳定在镁的沸点附近。(3)在预热区,颗粒相温度与气相温度变化趋势一致并低于气相温度,颗粒相温度未达到沸点,气相温度也不高。这是

因为颗粒相主要靠气相相对其对流传热来提高温度(在预热区镁颗粒的表面反应并不剧烈),所以预热区的气相温度总是高于颗粒相温度,而且镁颗粒在着火前没有挥发析出,预热区气相温度的提高只能靠燃烧区气体的导热和扩散过来的气相镁与氧气反应释放热量,并且预热区颗粒相未达到沸点,预热区均相反应不强烈,所以预热区的气相温度也比较低。

由以上分析可知,火焰传播速度由气相反应释热、颗粒相升温、气相导热、粉尘云体积热容等多个因素相互耦合控制;火焰温度由气相反应释热、颗粒相吸热等因素耦合控制;预热区厚度由气相导热、颗粒相吸热、粉尘云体积热容等因素耦合控制。镁颗粒的蒸发和气相镁与氧气的均相反应是产生火焰的直接原因,也是火焰得以传播的关键。当颗粒相对浓度比较大时,已燃区气相温度将低于火焰温度,稳定于镁的沸点左右。

3.2 颗粒相对浓度的影响

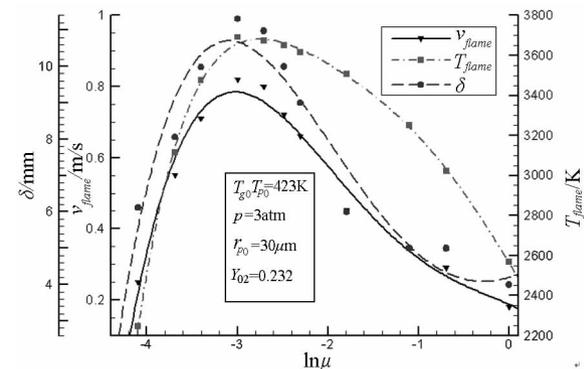


图 6 颗粒相对浓度对粉尘云燃烧的影响

Fig. 6 Effect of particle relative concentration

图 6 为颗粒相对浓度不同对粉尘云层流燃烧的影响(图中实心点为模型计算所得,线条由各数据点拟合所得,下同。横坐标为 μ 的自然对数)。由图中可知,在颗粒相对浓度较小的情况下,随颗粒相对浓度增加,火焰传播速度、火焰温度、预热区厚度都增加;而在颗粒相对浓度较大的情况下,变化规律则刚好相反,并且随颗粒相对浓度的持续增大, δ 的变化逐渐趋于平稳。关于颗粒相对浓度对镁粉尘云层流燃烧的影响未见有公开文献发表,但丁以斌^[11]通过对长管内铝粉尘云燃烧的研究发现:在小质量浓度情况下,火焰传播速度和火焰温度随粉尘云质量浓度的增加而增加;而在大质量浓度情况下,变化规律正好相反。这和本模型中的结论是一致的。分析如下:在颗粒相对浓度较小的情况下,增大颗粒相对浓度则意味着镁颗粒蒸发出的气相镁增多,气相反应释

放的热量也将增多,进而使 v_f 、 T_f 、 δ 都有所增加。而在颗粒相对浓度较大的情况下,增大颗粒相对浓度同样使镁颗粒蒸发出的气相镁增多,但由于气相中的氧气含量一定,气相反应释放的热量达到一定程度后不再增加,而随着颗粒相对浓度的增加,粉尘云的体积热容也在增加,粉尘云升温所需要的热量更多,所以使 T_f 下降,进而使 v_f 、 δ 都有所下降。由图还可知, $\ln \mu$ 在 -2.5 附近时, v_f 、 T_f 、 δ 达到最大值,即颗粒相对浓度约为 $1/12$ 时比较适合粉尘云层流燃烧。

3.3 颗粒粒径的影响

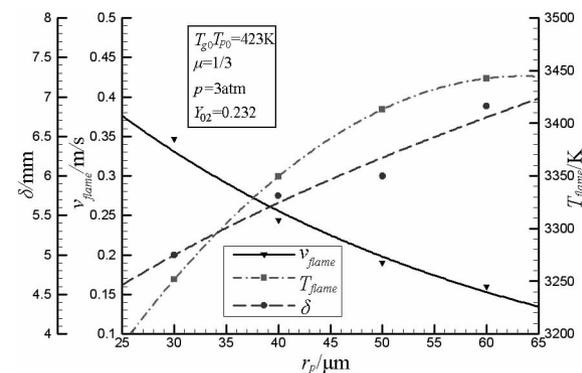


图 7 颗粒粒径对粉尘云燃烧的影响

Fig. 7 Effect of particle size

图 7 为颗粒粒径不同对粉尘云层流燃烧的影响。由图中可见,随粉尘云颗粒粒径的减小,火焰传播速度在增大,而火焰温度和预热区厚度在减小。此结论在工业生产及粉尘爆炸领域被广泛认可。Shoshin^[12]也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 ($44 \mu\text{m}$ 以下) 镁粉时火焰传播速度为 0.75 m/s ,而使用 -400 Mesh ($30 \mu\text{m}$ 以下) 镁粉时火焰传播速度增大为 1 m/s ; Dreizin^[13]则在常重力和失重条件下研究矩形腔内的镁粉尘云燃烧情况,实验所用镁颗粒在 $100 \sim 200 \mu\text{m}$,火焰传播速度约 0.1 m/s 。以上实验结果表明随颗粒粒径的减小,火焰传播速度在增大,验证了本模型的正确性。分析其原因是因为颗粒越小,其比表面积越大,其与气相热交换越迅速,在其他条件都不变的情况下,单位质量颗粒吸收热量也就越多,所以火焰温度和预热区厚度将减小;但同时颗粒升温也迅速,颗粒会很快达到沸点,使气相反应发生的时间提前,进而加快了火焰传播速度。

3.4 粉尘云初温的影响

图 8 为气相和颗粒相初温不同对粉尘云层流燃烧的影响。由图可知,随气相和颗粒相初温的升高, v_f 、 T_f 、 δ 都明显增大, v_f 、 T_f 与粉尘云初温

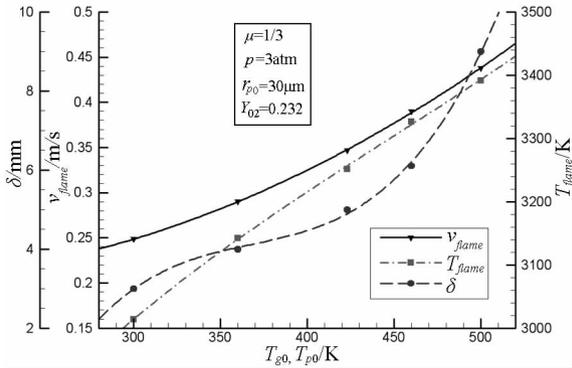


图8 粉尘云初温对粉尘云燃烧的影响

Fig. 8 Effect of initial temperature of particle cloud

呈线性增长关系, δ 与粉尘云初温呈抛物线增长关系。因为金属镁在着火前期表面反应很缓慢, 它的升温以气相对其表面换热为主, 所以提高粉尘云的初温, 实际上是直接缩短了镁颗粒缓慢氧化阶段的时间, 进而极大地缩短了镁颗粒达到沸点的时间, 所以火焰传播速度增大。粉尘云初温越高, 高温的燃烧区向未燃区传递的热量越少, 进而火焰温度更高, 预热区厚度更大。

4 结论

(1) 建立了镁粉尘云的一维层流预混燃烧模型, 模拟了镁粉尘云的燃烧过程。研究表明, 镁粉尘云层流火焰传播很稳定, 燃烧过程中火焰结构基本不变。粉尘云中镁颗粒的蒸发和气相镁与氧气的均相反应是产生火焰的直接原因, 也是火焰传播的关键。已燃区粉尘云的温度与颗粒相对浓度大小有关, 如果颗粒相对浓度较大, 则已燃区温度低于火焰温度且最终会稳定于镁的沸点左右。预热区气相温度提高主要靠燃烧区气体的导热和扩散过来的气相镁与氧气反应释放热量, 而预热区颗粒相温度提高主要靠气相对其对流传热。

(2) 颗粒相对浓度对粉尘云燃烧的影响比较复杂, 在浓度较低的情况下, 增大颗粒相对浓度有利于粉尘云快速燃烧; 而在浓度较高的情况下, 增大颗粒相对浓度对粉尘云燃烧起不利作用。数值模拟表明, 在颗粒相对浓度 μ 约为 1/12 时, 最适合粉尘云燃烧进行。

(3) 颗粒粒径对粉尘云燃烧的影响显著, 随颗粒粒径的增加, 火焰传播速度减小, 火焰温度升高, 预热区厚度增大。

(4) 粉尘云气相和颗粒相初温对层流燃烧影响明显, 火焰传播速度和火焰温度随粉尘云初温的增大线性增加, 预热区厚度则按抛物线增加。

本模型较全面地反映镁粉尘云的燃烧过程,

分析了各种参数对粉尘云燃烧的影响, 对粉末燃料冲压发动机预燃室一次空燃比的设计有一定的指导意义。

参考文献 (References)

- [1] 申慧君. 粉末燃料冲压发动机关键技术探索与研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
SHEN Huijun. Exploration and research on the key technologies of powdered fuel ramjet[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [2] A. 达维纳. 固体火箭推进剂技术[M]. 张德雄, 姚润森, 等, 译. 1版. 北京: 宇航出版社, 1997.
ALAIN Davenas. Solid rocket propellant technology [M]. ZHANG Dexiong, YAO Runsen, et al, translation. 1st edition. Beijing: Astronautics Publishing House, 1997. (in Chinese)
- [3] 钟英鹏, 徐冬, 李刚, 等. 镁粉尘云最低着火温度的实验测试[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(4): 429-433.
ZHONG Yingpeng, XU Dong, LI Gang, et al. Measurement of minimum ignition temperature for magnesium dust cloud[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(4): 429-433. (in Chinese)
- [4] Kudo Yuji, Kudo Yudai, Torikai Hiroyuki, et al. Effects of particle size on flame spread over magnesium powder layer[J]. Fire Safety Journal, 2010, 45, 122-128.
- [5] Ezhovskii G K, Ozerov E S. Combustion of powdered magnesium[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1978, 13(6): 716-721.
- [6] Breiter A L, Mal'tsev V M, Popov E I. Models of metal ignition[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1978, 13(4): 475-485.
- [7] 樊建锋, 杨根仓, 周尧和, 等. 纯镁的高温氧化特性研究[J]. 铸造技术, 2006, 27(6): 605-608, 612.
FAN Jianfeng, YANG Gencang, ZHOU Yaohe, et al. Oxidation behavior of ignition-proof magnesium-calcium alloys[J]. Foundry Technology, 2006, 27(6): 605-608, 612. (in Chinese)
- [8] 陈萍, 张茂勋. 镁及镁合金燃点的测试[J]. 特种铸造及有色合金-2002年压铸专刊, 2002: 323-324, 326.
CHEN Ping, ZHANG Maoxun. Measurement for the flammability point of Mg and Mg alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys-2002 year Die-casting Special Issue, 2002: 323-324, 326. (in Chinese)
- [9] Gurevich M A, Stepanov A M. Ignition limits of a metal particle[J]. Fizika Goreniya i Vzryva, 1968, 4(2), 189-195.
- [10] Angel A M, Abhijit M, Melvyn C B, et al. Combustion of magnesium with carbon dioxide and carbon monoxide at low gravity[J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(4): 852-859.
- [11] 丁以斌, 孙金华, 何学超, 等. 锆粉尘云的火焰传播特性[J]. 燃烧科学与技术, 2010, 16(4): 353-357.
DING Yibin, SUN Jinhua, HE Xuechao, et al. Flame propagation characteristic of zirconium particle cloud [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2010, 16(4): 353-357. (in Chinese)
- [12] Shoshin Y, Dreizin E. Particle combustion rates in premixed flames of polydisperse metal-air aerosols[J]. Combustion and Flame, 2003, 133: 275-287.
- [13] Dreizin E L, Hoffmann V K. Constant pressure combustion of aerosol of coarse magnesium particles in microgravity[J]. Combustion and Flame, 1999, 118: 262-280.