

镁粉与二氧化碳动态点火燃烧特性数值研究^{*}

李俊杰, 徐义华, 谷 湘

(南昌航空大学 飞行器工程学院 江西省微小航空发动机重点实验室, 江西 南昌 330063)

摘 要: Mg粉/CO₂粉末发动机是火星探测中较为理想的原位资源利用方案, 为了掌握Mg/CO₂粉末发动机稳定点火燃烧特性, 在考虑氧化层厚度对Mg颗粒熄火影响的基础上, 基于涡耗散/有限速率模型建立了点火燃烧模型, 并应用数值计算方法研究了Mg粉颗粒粒径(5 μ m, 10 μ m, 15 μ m, 20 μ m和25 μ m)、入口预混气流雷诺数(1500, 2000, 2500, 3000和3500)和CO₂/Mg氧燃比(0.5, 1, 1.5, 2和2.5)对Mg粉/CO₂动态点火燃烧的影响。计算结果表明: 雷诺数和氧燃比恒定时, 随着粒径从5 μ m增加到10 μ m, 平均温度升高, 平均点火时间延长, 燃烧效率增加; 随着粒径从10 μ m增加到25 μ m, 平均温度降低, 平均点火时间延长, 燃烧效率减少。粒径和氧燃比恒定时, 平均温度随雷诺数增加而下降; 平均点火时间和燃烧效率随雷诺数增加基本不变。粒径和雷诺数恒定, 随着氧燃比从0.5增大到1.5, 平均温度升高; 随着氧燃比从1.5增大到2.5, 平均温度下降; 平均点火时间和燃烧效率随氧燃比增大基本不变。

关键词: Mg/CO₂; 点火燃烧; 颗粒粒径; 雷诺数; 氧燃比

中图分类号: V513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2022) 06-200648-09

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200648

Numerical Study on Dynamic Ignition and Combustion Characteristics of Magnesium Powder and Carbon Dioxide

LI Jun-jie, XU Yi-hua, GU Xiang

(Jiangxi Key Laboratory of Micro Aeroengine, School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Mg powder/CO₂ powder engine is an ideal in-situ resource utilization scheme in Mars exploration. In order to master the stable ignition and combustion characteristics of Mg/CO₂ powder engine, considering the flameout of Mg particles affected by the thickness of the oxide layer, the ignition and combustion model was established based on eddy dissipation / finite rate model. The effects of Mg particle size, Reynolds number of pre-mixed flow and CO₂/Mg oxygen-fuel ratio on dynamic ignition and combustion of Mg powder/CO₂ were calculated by using the ignition combustion model, and the particle size of Mg powder was 5 μ m, 10 μ m, 15 μ m, 20 μ m and 25 μ m, the Reynolds number of inlet premixed gas was 1500, 2000, 2500, 3000 and 3500, and the CO₂/Mg oxygen-fuel ratio was 0.5, 1, 1.5, 2 and 2.5. The numerical results show that at constant Reynolds number and oxygen-fuel ratio, with the increase of particle size from 5 μ m to 10 μ m, the average temperature increases, the average ignition time prolongs and the combustion efficiency increases. With the increase of particle size from 10 μ m

^{*} 收稿日期: 2020-08-28; 修订日期: 2021-02-23。

基金项目: 国家自然科学基金(51666012)。

作者简介: 李俊杰, 硕士生, 研究领域为发动机工作过程仿真。

通讯作者: 徐义华, 博士, 教授, 研究领域为发动机工作过程仿真。

引用格式: 李俊杰, 徐义华, 谷 湘. 镁粉与二氧化碳动态点火燃烧特性数值研究[J]. 推进技术, 2022, 43(6):200648.
(LI Jun-jie, XU Yi-hua, GU Xiang. Numerical Study on Dynamic Ignition and Combustion Characteristics of Magnesium Powder and Carbon Dioxide[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(6):200648.)

to $25\mu\text{m}$, the average temperature decreases, the average ignition time prolongs and the combustion efficiency decreases. At constant particle size and oxygen-fuel ratio, the average temperature decreases with the increase of Reynolds number, while the average ignition time and combustion efficiency remain unchanged with the increase of Reynolds number. At constant particle size and Reynolds number, with the increase of oxygen-fuel ratio from 0.5 to 1.5, the average temperature increases. With the increase of oxygen-fuel ratio from 1.5 to 2.5, the average temperature decreases. The average ignition time and combustion efficiency basically remain unchanged with the increase of oxygen-fuel ratio.

Key words: Mg/CO₂; Ignition and combustion; Particle size; Reynolds number; Oxygen-fuel ratio

1 引言

为实现火星探索中的原位资源利用, Mg粉/CO₂粉末发动机引起了国内外学者们的高度关注^[1-6]。例如, Foote等^[1]认为以Mg粉/CO₂为基础的推进系统可以利用火星资源, 部分或全部代替从地球上携带的燃料和氧化剂; Wickman^[3]通过Mg粉/CO₂低压燃烧试验, 试验结果表明在较低的火星大气压下确实发生了Mg粉/CO₂燃烧反应; 李悦等^[6]提出以粉末火箭推进系统, 具有推力可调、结构简单和可靠性高等性能优势, 在航天探测等领域有重要的研究价值。为提高发动机启动和工作的稳定性, 已经对Mg粉/CO₂点火燃烧特性进行了初步的研究。

Shafirovich等^[7]提出Mg粉/CO₂燃烧反应机制由均相反应(Mg蒸汽与CO₂气体反应)和异相反应(Mg蒸汽与CO₂气体反应生成的CO与液态Mg反应)共同组成; 通过实验发现均相反应与普通气态燃料-氧化剂扩散火焰非常相似^[8-9], 可应用涡耗散模型控制其反应速率; 异相反应速率可应用有限速率模型控制^[10]; King^[11]进一步建立Mg粉/CO₂燃烧两区域反应模型, 但King模型忽略Mg颗粒表面氧化膜对Mg粉/CO₂点火燃烧的影响, 也无法解释在点火燃烧过程中氧化膜空心球体的形成^[12]。

MgO的高熔点导致点火燃烧过程中Mg颗粒表面会覆盖一层氧化膜^[13]; 氧化膜在高温下受到Mg蒸汽的气泡挤压, 当颗粒升温, Mg蒸汽压力随之增加, 最终导致氧化膜的破裂, 释放Mg蒸汽, 随后气泡内Mg蒸汽压力降低, CO回流而发生异相反应^[14-15]; Shafirovich等^[16]实验可知, CO与液态Mg反应生成的固态MgO和C附着在颗粒表面, 熄火后颗粒氧化层内径与颗粒初始半径相同。Legrand等^[17]在充满CO₂的气室中点燃悬浮的单个Mg颗粒, 颗粒粒径50~100 μm , 得出火焰燃烧时间与粒径的平方成正比; Fukuchi等^[8]实验得到在入口管径为25mm, CO₂气流速度超过0.5m/s时, Mg/CO₂扩散火焰不稳定, 则表明超

过一定的雷诺数时火焰不稳定; Goroshin等^[18]实验得出CO₂中Mg粉浓度低于990g/m³, 难以获得稳定的动态Mg粉/CO₂预混火焰。

综上所述, 现有文献研究表明, Mg粉/CO₂燃烧模型主要为两区域反应模型; 气流雷诺数过高、CO₂中Mg粉浓度过小即(CO₂/Mg)预混气流氧燃比过大, 都将导致火焰不稳定; 对于粒径大于50 μm 的Mg粉颗粒, 火焰燃烧时长与其粒径成正比, 但在实际的Mg粉/CO₂粉末发动机中, Mg粉粒径小于20 μm ^[18]。因此, 为深入了解Mg粉颗粒粒径、预混气流雷诺数和CO₂/Mg氧燃比对点火燃烧的影响规律, 本文拟考虑氧化膜厚度增加对Mg颗粒熄火的影响, 基于涡耗散/有限速率模型建立点火燃烧模型, 通过数值模拟研究不同的Mg粉颗粒粒径、预混气流雷诺数和CO₂/Mg氧燃比的Mg粉/CO₂点火燃烧特性。

2 点火燃烧模型

2.1 Mg粉/CO₂点火燃烧反应过程简化

Mg颗粒在CO₂中的点火过程是极其复杂的, 为了便于点火燃烧模型的建立, 做如下假设:

(1) Mg颗粒呈球形, 氧化膜分布均匀致密, 厚度为颗粒半径1%^[19]。

(2) 忽略不同位置氧化膜力学性能的差异, 外界环境压力保持0.1MPa不变。

(3) 忽略点火过程中颗粒加热引起的膨胀, 认为氧化膜厚度与金属球体半径的比值不变。

(4) 异相反应产生的MgO和C全部在氧化膜表面沉积。

(5) 忽略点火燃烧过程中的辐射传热。

(6) 点火过程中, 在入口附近的模拟点火器的温度设为1500K。

基于以上假设, 并根据文献[14-16], 可将Mg与CO₂点火燃烧过程描述如下:

(1) 点火过程。随着Mg颗粒升温, 颗粒温度达到熔点(923K^[13]), Mg液滴蒸发。根据文献[16]和氧化

膜强度验算,颗粒温度达到熔点时,颗粒实现点火,即颗粒点火温度 $T_{ig}=923\text{K}$ 。

(2)燃烧过程。燃烧过程中,Mg颗粒温度达到沸点($1363\text{K}^{[13]}$)时保持不变。MgO的熔点($3075\text{K}^{[13]}$)高于Mg的沸点导致颗粒表面会覆盖一层氧化膜。随着氧化层内Mg蒸发,在氧化层内产生充满蒸汽的气泡。在气泡的挤压下,氧化层所受机械应力超过其塑性极限,导致部分氧化层破裂并形成孔洞。Mg蒸汽通过这些孔洞与 CO_2 发生均相反应产生MgO和CO。随着蒸汽释放,气泡内的蒸汽压力下降,使CO回流并与液态Mg发生异相反应。反应产生的MgO和C在氧化层表面沉积,由于颗粒粒径较小,忽略沉积的不均匀性,认为氧化层厚度均匀增加。与此同时,在Mg蒸汽压力的作用下,颗粒继续释放蒸汽,进而形成稳定的均相反应和异相反应的燃烧过程。

(3)熄火过程。随着颗粒的持续燃烧,气室蒸汽压力降低和氧化膜厚度逐渐增加,在某一时刻,蒸汽压力不足以克服氧化层孔隙阻力,使得Mg蒸汽释放过程终止,导致颗粒熄火。

2.2 点火燃烧模型

点火过程中,在颗粒与气流间的对流换热作用下,其温度 $T_p(\text{K})$ 随时间 $t(\text{s})$ 的变化

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{hA_p}{m_p c_p} (T_{amb} - T_p) \quad (1)$$

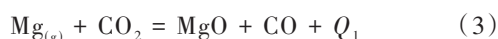
式中 A_p 是颗粒初始表面积, m_p 是颗粒质量, c_p 是颗粒的比热容, T_{amb} 是环境温度, T_p 是颗粒温度, h 是对流换热系数。

$$h = K_\infty (2.0 + 0.6Re_d^{1/2} Pr^{1/3}) / d_p \quad (2)$$

式中 d_p 是颗粒粒径, K_∞ 是气流的热传导系数, Re_d 是颗粒与气流的相对速度确定的雷诺数, Pr 是气流的普朗特数。

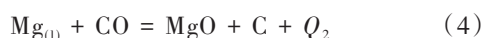
当颗粒温度达到熔点(923K)时,颗粒液滴化蒸发,进入燃烧阶段。将燃烧过程中的颗粒视为由厚度为 r_{ox} 的氧化膜包裹的充满液态Mg和Mg蒸汽的弹性球体,如图1所示。

图1所示的均相反应 R_1 化学方程式为



式中 $Q_1 = -318.9\text{kJ/mol}^{[14]}$ 。均相反应速率采用涡流耗散模型,反应速率受Mg蒸汽和 CO_2 的湍流混合程度影响。

图1所示的异相反应 R_2 化学方程式为



式中 $Q_2 = -490.9\text{kJ/mol}^{[14]}$ 。异相反应速率采用有

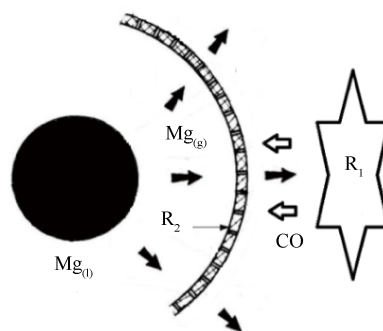


Fig. 1 Theoretical model of combustion

限速率模型,反应速率受反应速率常数 K_{R_2} 和颗粒表面CO浓度控制,其中反应速率常数 $K_{R_2} = Ae^{-E_A/(RT_p)}$,指前因子 $A = 2 \times 10^9 \text{m}^3/(\text{kmol} \cdot \text{s})$,活化能 $E_A = 1.26 \times 10^8 \text{J/kmol}^{[20]}$ 。

燃烧过程中,纯Mg颗粒质量消耗率公式为

$$\frac{dm_p}{dt} = -NA_p M_{Mg} \quad (5)$$

式中 M_{Mg} 是Mg的摩尔质量; N 是Mg蒸汽摩尔通量 ($\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), $N = K_c \Delta C_{Mg}$,其中 K_c 是传质系数 (m/s), ΔC_{Mg} 是颗粒表面与预混气流中的Mg蒸汽浓度差 (kmol/m^3)。

燃烧过程中氧化膜厚度增长率公式为

$$\frac{dr_{ox}}{dt} = \left(\frac{\dot{M}_{MgO}}{\rho_{MgO}} + \frac{\dot{M}_c}{\rho_c} \right) \frac{1}{A_p} \quad (6)$$

式中 $\dot{M}_{MgO}$ 为MgO沉积质量流量, ρ_{MgO} 为MgO密度, $\dot{M}_c$ 为C沉积质量流量, ρ_c 为C密度。

燃烧过程中颗粒温度变化公式为

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{c_p m_p} ((hA_p (T_{amb} - T_p)) + h_{fg} \frac{dm_p}{dt} + Q_2) \quad (7)$$

式中 h_{fg} 为蒸发潜热。

根据Von Mises屈服准则,氧化膜表面的应力张量 σ_r , σ_ϕ 和 $\sigma_x^{[21]}$ 分别为

$$\sigma_r = \frac{1}{(r_0 + r_{ox})^3 - r_0^3} (p_{Mg} r_0^3 - p_{amb} (r_0 + r_{ox})^3 + \frac{r_0^3 (r_0 + r_{ox})^3 (p_{amb} - p_{Mg})}{r_0^3}) \quad (8)$$

$$\sigma_\phi = \sigma_x = \frac{1}{(r_0 + r_{ox})^3 - r_0^3} (p_{Mg} r_0^3 - p_{amb} (r_0 + r_{ox})^3 - \frac{r_0^3 (r_0 + r_{ox})^3 (p_{amb} - p_{Mg})}{2r_0^3}) \quad (9)$$

式中 p_{amb} 为作用在氧化膜表面的环境压力,Mg蒸汽压强 p_{Mg} 通过理想气体状态方程确定, r_0 为氧化层内表面半径,等于颗粒初始半径。

根据公式(8)~(9)得到氧化膜所受机械应力为

$$\sigma_{eq} = |\sigma_{\phi} - \sigma_r| = 1.5 \left| \frac{p_{Mg} - p_{amb}}{(1 - (r_0/(r_0 + r_{ox}))^3)} \right| \quad (10)$$

氧化膜的塑性极限 $\sigma_{pl} = 1372\text{MPa}$, 当 $\sigma_{eq} < \sigma_{pl}$ 时颗粒熄火。

2.3 点火燃烧模型验证

为了校验 Mg 粉/ CO_2 点火燃烧模型精度, 对文献 [22] 的实验模型进行了计算。

文献 [22] 基于彩色 CCD 图像法测温技术, 得到粒径 $10\mu\text{m}$, 入口预混气流雷诺数 2500, CO_2/Mg 氧燃比 1.5 时动态 Mg 粉/ CO_2 燃烧火焰实验温度场, 如图 2 所示。根据 CCD 图像法测温原理, 该方法所得到的火焰温度场是外焰和内焰温度在投影面上的平均分布。由图 2 可知, 实验温度场高温区分布在火焰中线附近, 其火焰最高温度为 2853K 。

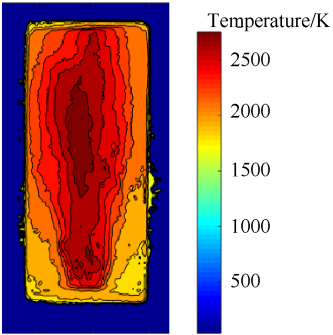


Fig. 2 Experimental temperature field of dynamic Mg powder / CO_2 combustion flame

基于实验物理模型, 建立长为 100mm 、直径为 60mm , Mg 粉和 CO_2 入口直径为 20mm 的二维轴对称模型, 如图 3 所示。

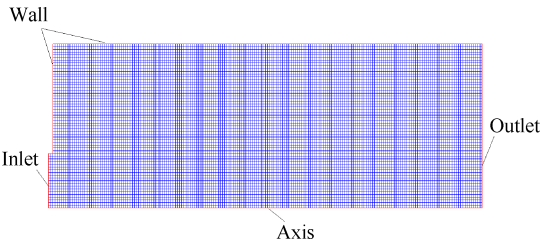


Fig. 3 Computational model

燃烧室壁面采用绝热、速度无滑移条件, 压力、各组份质量分数梯度为零。入口采用质量流量入口, 出口采用压力出口。湍流模型采用 $k-\varepsilon$ 模型, 颗粒相采用拉格朗日颗粒轨道模型进行计算, 计算的颗粒粒径为 $10\mu\text{m}$, 入口预混气流雷诺数为 2500, 氧燃比为 1.5, 点火环境温度为 1500K , 计算采用结构网格, 为了验证网格无关性, 分别对网格数为 1500,

4500 和 7000 的模型进行计算, 其结果温度场分布如图 4 所示。

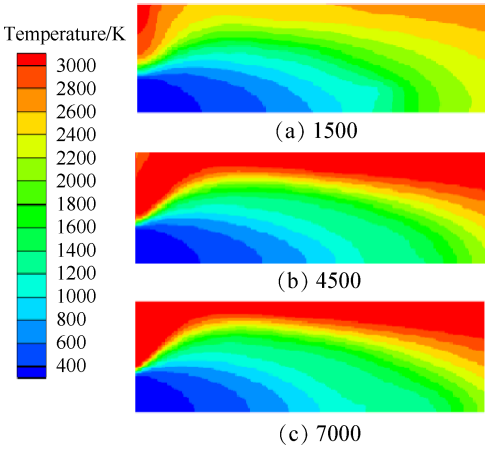


Fig. 4 Temperature nephogram of simulated flame

由图 4 可知, 火焰外焰温度较高, 内焰温度较低, 网格数 1500 的火焰温度场分布与网格数 4500 的火焰温度场分布有较大差异, 网格数 4500 和 7000 的火焰温度场分布基本一致。沿对称轴轴向每 10mm 取截面, 通过对各截面的内外焰温度取平均, 得到各截面内外焰平均温度 T_{sc} 的分布, 如图 5 所示, 由图可知, 网格数 1500 的沿对称轴的火焰平均温度比网格数 4500 的沿对称轴的火焰平均温度低, 网格数 4500 和 7000 的沿对称轴的火焰平均温度基本一致, 为节约计算资源, 后续计算均选择网格数 4500 的结构网格。数值计算得到的最高平均温度为 2762K , 与实验误差为 3.2% , 模型具有较高精度。

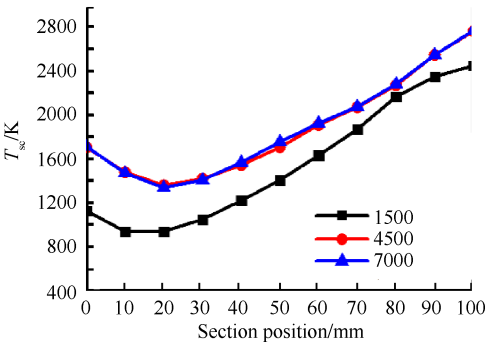


Fig. 5 Average flame temperature of each section

2.4 点火燃烧表征

2.4.1 颗粒群平均点火时间

颗粒群平均温度 T_p 等于各颗粒温度 $T_{p,i}$ 的平均, 即 $T_p = (\sum T_{p,i})/N (1 \leq i \leq N)$, 其中 N 是颗粒群中的颗粒数量。在点火环境温度为 1500K 时, T_p 随时间 t 的

变化如图6所示,由图可知,当 T_p 达到点火温度 T_{ig} (923K)之前, T_p 随 t 基本呈现线性增加,平均点火时间 t_{ig} 为0.0263s;当 T_p 达到镁的沸点(1363K)时保持不变,直到燃烧结束。

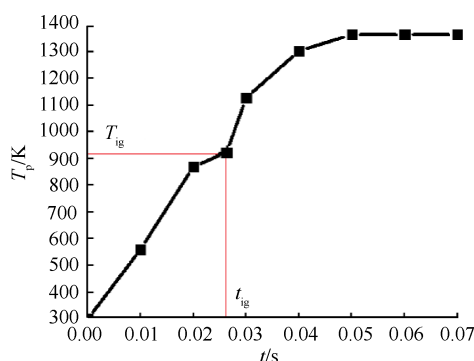


Fig. 6 Average temperature varies with time

2.4.2 颗粒群平均氧化层厚度

平均氧化层厚度 r_{ox} 等于各颗粒氧化层厚度 $r_{ox,i}$ 的平均,即 $r_{ox} = (\sum r_{ox,i})/N (1 \leq i \leq N)$ 。在点火燃烧时 r_{ox} 随 t 变化关系如图7所示,由图可知,点火前 r_{ox} 保持不变,即颗粒初始半径 r_{s0} 的1%, $r_{ox} = 5.0 \times 10^{-8}m$,燃烧时 r_{ox} 随 t 急剧增加,熄火时 r_{ox} 达到最大, $r_{ox} = 8.02 \times 10^{-7}m$,其对应时间即颗粒群平均熄火时间 t_{qu} 。

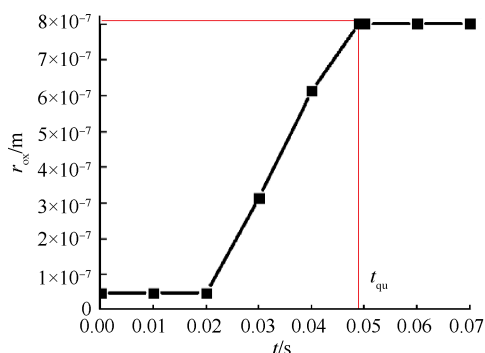


Fig. 7 Average thickness of oxide film varies with time

2.4.3 颗粒群平均质量及燃烧效率

颗粒群纯Mg颗粒平均质量 m_p 等于各纯Mg颗粒质量 $m_{p,i}$ 的平均,即 $m_p = (\sum m_{p,i})/N (1 \leq i \leq N)$ 。由前文可知 r_{ox} 较小,故不考虑氧化层增厚的影响。在点火燃烧时 m_p 随 t 变化关系如图8所示,由图可知,点火前 m_p 保持不变, $m_p = m_{p0}$;燃烧时 m_p 随 t 基本呈现线性递减;熄火时 m_p 不再随 t 变化,其平均剩余质量记为 m_{pf} 。 m_{p0} 和 m_{pf} 之差即为平均消耗质量 m_{ps} , m_{ps} 和 m_{p0} 之商为燃烧效率: $\eta_p = m_{ps}/m_{p0}$ 。

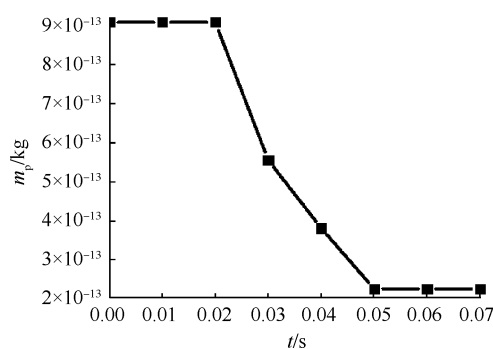


Fig. 8 Average particle mass varies with time

3 Mg/CO₂动态点火燃烧影响因素分析

3.1 粒径对动态点火燃烧的影响

3.1.1 不同粒径下燃烧温度分布

在预混气流雷诺数2500,CO₂/Mg氧燃比为1.5时,CO₂和Mg颗粒质量流量不变,选取Mg颗粒粒径为5 μm ,10 μm ,15 μm ,20 μm 和25 μm ,分析Mg颗粒粒径对动态点火燃烧的影响。

图9为不同粒径下的燃烧温度云图,由图可知,不同粒径下燃烧火焰结构基本一致,火焰由内到外温度逐渐升高,外焰最高温度大于3200K。随着颗粒粒径增大,低温范围逐渐增大。

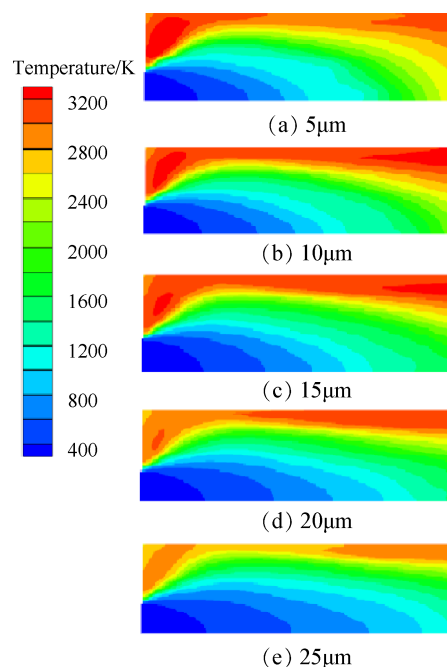


Fig. 9 Temperature nephogram under different particle sizes

为了定量分析不同粒径下燃烧温度分布特性,图10给出了各粒径下整个燃烧室内的平均温度 T_{ce} ,由图可知,粒径为10 μm 时平均温度最高, $T_{ce} =$

2390K, 颗粒粒径为 $5\mu\text{m}$ 时平均温度略低于 $10\mu\text{m}$ 时的平均温度, 粒径从 $10\mu\text{m}$ 增加到 $25\mu\text{m}$ 时, 平均温度随着粒径的增大而减小。

颗粒粒径越大, 颗粒升温吸热越多, 导致平均温度下降。粒径 $5\mu\text{m}$ 时气流流化较好, 颗粒在燃烧室内流动时间较短, 总放热量较少, 导致平均温度略低于 $10\mu\text{m}$ 的平均温度。

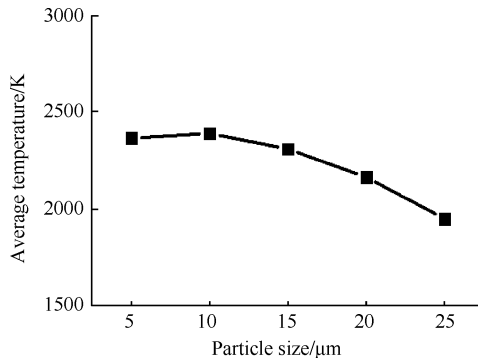


Fig. 10 Average temperature under different particle sizes

3.1.2 不同粒径下平均点火时间

图 11 为不同粒径下的平均点火时间, 由图可知, 粒径为 $5\mu\text{m}$ 时, 其平均点火时间最短, $t_{\text{ig}} = 0.0249\text{s}$; 粒径为 $25\mu\text{m}$ 时, 其平均点火时间最长, $t_{\text{ig}} = 0.0624\text{s}$ 。粒径从 $5\mu\text{m}$ 增大到 $25\mu\text{m}$ 时, 平均点火时间随粒径增大而延长。

合并公式 (1), (2) 可得式 (11), 由式 (11) 可知, 点火过程中, 在环境温度相同条件下, 颗粒温升速率与颗粒粒径平方成反比, 故平均点火时间随颗粒粒径的增加而延长, 粒径 $5\mu\text{m}$ 时温升速率最高, 平均点火时间最短。

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{3k_\infty \left(2.0 + 0.6Re_d^{1/2} Pr^{1/3} \right)}{\rho_p C_p d_p^2} (T_{\text{amb}} - T_p) \quad (11)$$

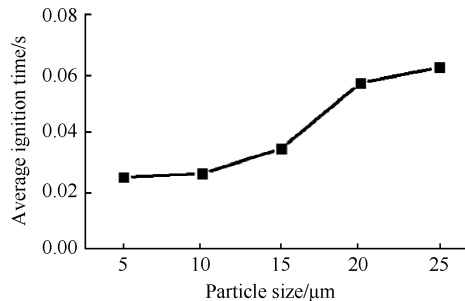


Fig. 11 Average ignition time under different particle sizes

3.1.3 不同粒径下燃烧效率

图 12 为不同粒径下的燃烧效率, 粒径为 $10\mu\text{m}$ 时的燃烧效率最高, $\eta_p = 0.75$; 粒径为 $25\mu\text{m}$ 时, 其燃烧

效率最小, $\eta_p = 0.55$ 。粒径为 $5\mu\text{m}$ 时, 其燃烧效率小于粒径为 $10\mu\text{m}$ 时的燃烧效率, 粒径从 $10\mu\text{m}$ 增加到 $25\mu\text{m}$ 时, 其燃烧效率随粒径增大而下降。

颗粒粒径越大, 液滴温升速率越小, 液滴蒸发越困难, 使颗粒剩余质量增加, 导致燃烧效率降低。颗粒粒径为 $5\mu\text{m}$ 时, 气流流化效果好, 颗粒在燃烧室内流动时间缩短, 液滴蒸发总量减少, 导致燃烧效率低于 $10\mu\text{m}$ 时的燃烧效率。

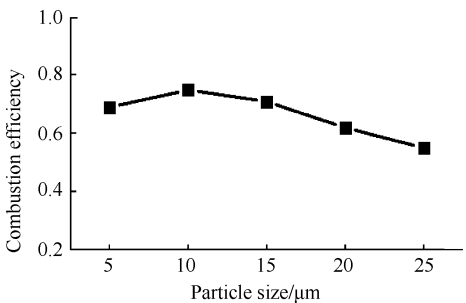


Fig. 12 Combustion efficiency under different particle sizes

综上所述, 颗粒粒径从 $5\mu\text{m}$ 增加到 $10\mu\text{m}$ 时, 燃烧室平均温度升高, 平均点火时间延长, 燃烧效率增加; 颗粒粒径从 $10\mu\text{m}$ 增加到 $25\mu\text{m}$ 时, 燃烧室平均温度降低, 平均点火时间延长, 燃烧效率减少。

3.2 雷诺数对动态点火燃烧的影响分析

3.2.1 不同雷诺数下燃烧温度分布

在 Mg 颗粒粒径为 $10\mu\text{m}$, CO_2/Mg 氧燃比为 1.5 时, 改变 CO_2 和 Mg 颗粒的质量流量, 选取预混气流雷诺数为 1500, 2000, 2500, 3000 和 3500, 分析预混气流雷诺数对动态点火燃烧的影响。

图 13 为不同雷诺数下的燃烧温度云图, 由图可知, 不同雷诺数下燃烧火焰结构基本一致, 火焰由内到外温度逐渐升高, 外焰最高温度大于 3200K。随着雷诺数增大, 低温范围逐渐增大。

为了定量分析不同雷诺数下燃烧温度分布特性, 图 14 给出了不同雷诺数下整个燃烧室内的平均温度 T_{ce} , 由图可知, 雷诺数为 1500 时, 燃烧室内平均温度最高, $T_{\text{ce}} = 2680\text{K}$, 燃烧室内平均温度随着雷诺数的增大而减小。

雷诺数越高, CO_2 气流和 Mg 颗粒质量流量越高, 预混气流升温所需热量增加, 导致燃烧室平均温度下降。

3.2.2 雷诺数对平均点火时间的影响

图 15 为不同雷诺数下的平均点火时间, 由图可知, 雷诺数在 1500 ~ 3500 内, 平均点火时间变化不大, 但雷诺数为 2000 和 3000 时, 平均点火时间较长。

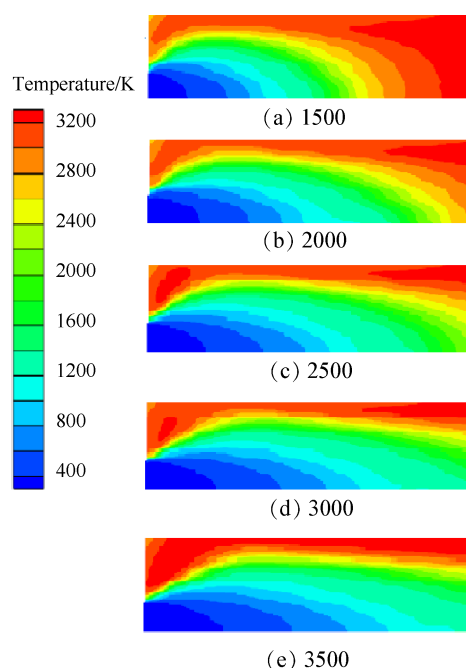


Fig. 13 Temperature nephogram under different Reynolds numbers

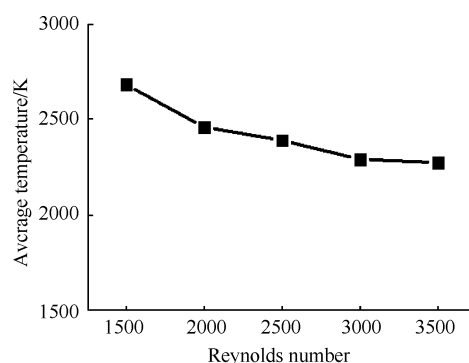


Fig. 14 Average temperature under different Reynolds numbers

雷诺数为1500时,平均点火时间最短, $t_{ig} = 0.0234s$ 。雷诺数为2000时,平均点火时间最长, $t_{ig} = 0.0313s$ 。

由于颗粒粒径相同,对流加热效果相似,平均点火时间随雷诺数增加变化较小。但雷诺数为2000和3000时, CO_2 气流质量流量和Mg颗粒质量流量增大,

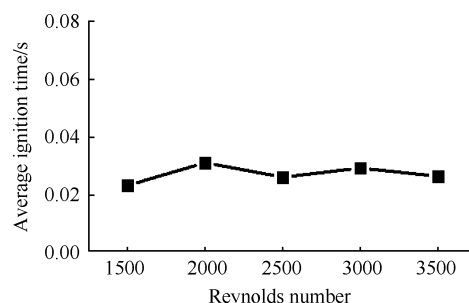


Fig. 15 Average ignition time under different Reynolds numbers

使颗粒点火所需的热量较多,导致平均点火时间略有延长。

3.2.3 雷诺数对燃烧效率的影响

图16显示不同雷诺数下燃烧时的燃烧效率,由图16可知,雷诺数在1500~3500内,燃烧效率变化不大,但雷诺数为1500和3500时,燃烧效率较小。雷诺数为2500时,燃烧效率最高, $\eta_p = 0.75$ 。雷诺数为1500时,燃烧效率最小, $\eta_p = 0.695$ 。

由于颗粒粒径相同,液滴蒸发所需的热量相似,燃烧效率随雷诺数增加变化较小。但雷诺数为1500时, CO_2 气流和Mg颗粒质量流量较小,燃烧反应速率较低,导致燃烧效率略低;雷诺数为3500时,Mg颗粒速度提高,使得颗粒在燃烧室停留时间减小,导致燃烧效率略有下降。

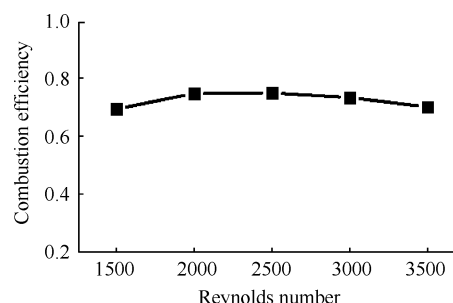


Fig. 16 Combustion efficiency under different Reynolds numbers

综上所述,燃烧室平均温度随雷诺数增加而下降,平均点火时间和燃烧效率随雷诺数增加基本不变。

3.3 CO_2/Mg 氧燃比对动态点火燃烧的影响分析

3.3.1 不同 CO_2/Mg 氧燃比下燃烧温度分布

在Mg颗粒粒径为 $10\mu m$ 、预混气流雷诺数为1500时, CO_2 质量流量不变,调节Mg颗粒质量流量,使 CO_2/Mg 氧燃比为0.5, 1, 1.5, 2和2.5,分析 CO_2/Mg 氧燃比对动态点火燃烧的影响。

图17为不同 CO_2/Mg 氧燃比下的燃烧温度云图,由图可知,不同 CO_2/Mg 氧燃比下燃烧火焰结构基本一致,火焰由内到外温度逐渐升高,外焰最高温度大于3200K。随着 CO_2/Mg 氧燃比从0.5增大到1.5,低温范围缩小; CO_2/Mg 氧燃比从1.5增大到2.5,低温范围增大; CO_2/Mg 氧燃比为0.5时,颗粒质量流量过大,使液滴蒸发吸热过多,导致燃烧室低温区范围较大。

为了定量分析不同 CO_2/Mg 氧燃比下燃烧温度分布特性,图18给出了不同 CO_2/Mg 氧燃比下整个燃烧室内的平均温度 T_{cc} ,由图18可知, CO_2/Mg 氧燃比

为 1.5 时,燃烧室内平均温度最高, $T_{ce} = 2680\text{K}$ 。 CO_2/Mg 氧燃比从 0.5 增大到 1.5 时,平均温度随着 CO_2/Mg 氧燃比的增大而升高; CO_2/Mg 氧燃比从 1.5 增大到 2.5 时,平均温度随着 CO_2/Mg 氧燃比的增大而降低。

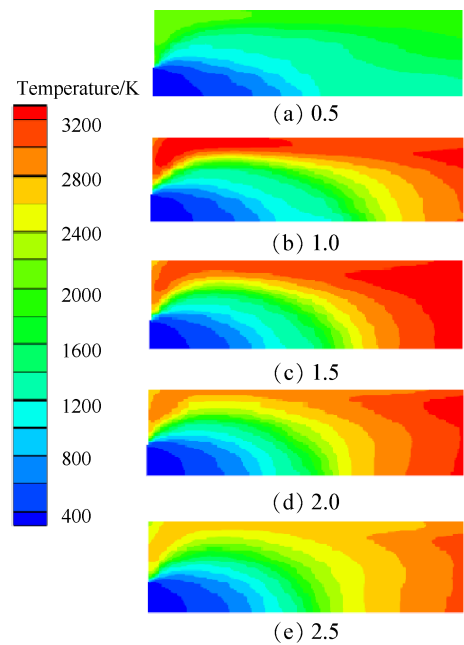


Fig. 17 Temperature nephogram under different CO_2/Mg oxygen-fuel ratio

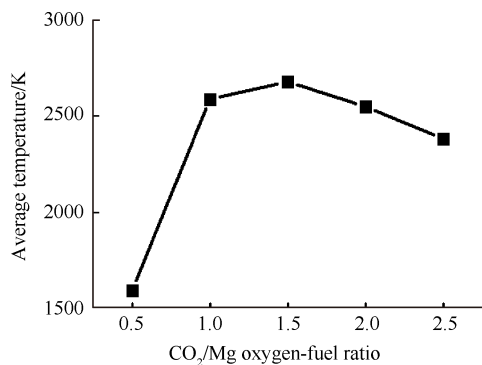


Fig. 18 Average temperature under different CO_2/Mg oxygen-fuel ratio

CO_2/Mg 氧燃比从 0.5 增大到 1.5, Mg 颗粒质量流量下降,颗粒升温总吸热量下降,导致平均温度升高; CO_2/Mg 氧燃比从 1.5 增大到 2.5,颗粒质量流量下降,燃烧放热减少,导致平均温度下降。

3.3.2 CO_2/Mg 氧燃比对平均点火时间的影响

图 19 为不同 CO_2/Mg 氧燃比下燃烧时的平均点火时间,由图可知,在 CO_2/Mg 氧燃比为 0.5 ~ 2.5 内,平均点火时间变化不大,但 CO_2/Mg 氧燃比为 0.5 和 1.5 时,平均点火时间变化较大。 CO_2/Mg 氧燃比为 0.5

时平均点火时间最长, $t_{ig} = 0.0426\text{s}$; CO_2/Mg 氧燃比为 1.5 时平均点火时间最短, $t_{ig} = 0.0234\text{s}$ 。

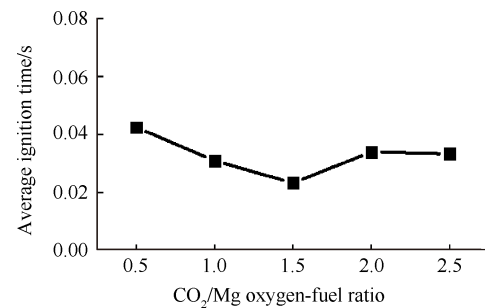


Fig. 19 Average ignition time under different CO_2/Mg oxygen-fuel ratio

由于颗粒粒径相同,颗粒点火所需的热量相当,从而平均点火时间随 CO_2/Mg 氧燃比增大变化较小。但是, CO_2/Mg 氧燃比为 0.5 时,颗粒质量流量较大,点火所需的热量较多,导致平均点火时间较长;而 CO_2/Mg 氧燃比为 1.5 时,颗粒质量流量较小,点火所需的热量较少,导致平均点火时间较短。

3.3.3 CO_2/Mg 氧燃比对燃烧效率的影响

图 20 为不同 CO_2/Mg 氧燃比下燃烧时的燃烧效率,由图可知,在 CO_2/Mg 氧燃比为 0.5 ~ 2.5 内,燃烧效率变化不大。但是, CO_2/Mg 氧燃比为 0.5 时,其燃烧效率最小, $\eta_p = 0.63$; CO_2/Mg 氧燃比为 1.0 时,其燃烧效率最高, $\eta_p = 0.73$ 。

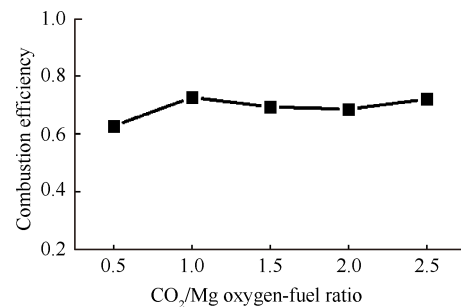


Fig. 20 Combustion efficiency under different CO_2/Mg oxygen-fuel ratio

由于颗粒粒径相同,液滴蒸发所需热量相似,燃烧效率随氧燃比增大变化较小。但是, CO_2/Mg 氧燃比为 0.5 时, Mg 颗粒质量流量较大,使颗粒升温吸热量较多,液滴蒸发较困难,导致燃烧效率较低。

综上所述, CO_2/Mg 氧燃比从 0.5 增大到 1.5,平均温度升高;从 1.5 增大到 2.5,平均温度下降。平均点火时间和燃烧效率随 CO_2/Mg 氧燃比增大基本不变。

4 结 论

通过本文研究,得到结论如下:

(1)雷诺数和 CO_2/Mg 氧燃比相同,粒径为 $5\mu\text{m}$ 时,平均点火时间最短;粒径为 $10\mu\text{m}$ 时,平均温度最高,燃烧效率最高。

(2)粒径和 CO_2/Mg 氧燃比相同,雷诺数为 1500 时,平均温度最高,平均点火时间最短;雷诺数为 2500 时,燃烧效率最高。

(3)粒径和雷诺数相同, CO_2/Mg 氧燃比为 1.0 时,燃烧效率最高; CO_2/Mg 氧燃比为 1.5 时,平均温度最高,平均点火时间最短。

致 谢:感谢国家自然科学基金的资助、感谢西北工业大学胡旭博士对点火燃烧模型研究提供的帮助。

参考文献

- [1] Foote J, Litchford R. Powdered Magnesium-Carbon Dioxide Combustion for Mars Propulsion[C]. Tucson: 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2005.
- [2] Sanders G B. ISRU: An Overview of NASA's Current Development Activities and Long-Term Goals[R]. AIAA 2000-1062.
- [3] Wickman J H. In-Situ Mars Rocket and Jet Engines Burning Carbon Dioxide[R]. AIAA 99-2409.
- [4] Shafirovich E, Varma A. Metal- CO_2 Propulsion for Mars Missions: Current Status and Opportunities[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2008, 24(3): 385-394.
- [5] 杨亚晶, 谢 伟, 魏衍举. $\text{Mg}-\text{O}_2$ 和 $\text{Mg}-\text{CO}_2$ 预混气燃烧特性及热声振荡的数值模拟研究[J]. *推进技术*, 2019, 40(2): 129-141. (YANG Ya-jing, XIE Wei, WEI Yan-ju. Numerical Simulation of Combustion Characteristics and Thermoacoustic Oscillation of $\text{Mg}-\text{O}_2$ and $\text{Mg}-\text{CO}_2$ Premixed Gases[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(2): 129-141.)
- [6] 李 悦, 胡春波, 胡加明, 等. 粉末火箭发动机研究进展[J]. *推进技术*, 2018, 39(8): 1681-1695. (LI Yue, HU Chun-bo, HU Jia-ming, et al. Research Progress of Powder Rocket Engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(8): 1681-1695.)
- [7] Shafirovich E Y, Goldshleger U I. Combustion of Magnesium Particles in CO_2/CO Mixtures[J]. *Combustion, Science and Technology*, 1992, 84(1-6): 33-43.
- [8] Fukuchi A, Kawashima M, Yuasa S. Combustion Characteristics of $\text{Mg}-\text{CO}_2$ Counterflow Diffusion Flame[C]. Naples: Symposium (International) on Combustion. Elsevier, 1996.
- [9] 张远君. 金属推进燃料的研究进展[J]. *推进技术*, 1981(3): 66-74. (ZHANG Yuan-jun. Research Progress of Metal Propulsion Fuel[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1981(3): 66-74.)
- [10] Abbud-Madrid A, Stroud C, Omaly P. Combustion of Bulk Magnesium in Carbon Dioxide under Reduced-gravity Conditions[C]. Reno: 37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1999.
- [11] King M K. A Simplified Two-Reaction Zone Model of Magnesium Combustion Carbon Dioxide[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29(2): 2931-2938.
- [12] Rosenband V, Gany A, Timnat Y M. A Model for Low-temperature Ignition of Magnesium Particles[J]. *Combustion Science and Technology*, 1995, 105(4-6): 279-294.
- [13] Modak A, Dreyer C, Abbud-Madrid A, et al. Numerical Simulation of the Structure of Metal/Carbon-Dioxide Flames in Microgravity[C]. Reno: 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2000.
- [14] Yuasa S, Fukuchi A. Ignition and Combustion of Magnesium in Carbon Dioxide Streams[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1994, 25(1): 1587-1594.
- [15] Valov A E, Kustov Y A, Shevtsov V I. Spectroscopic Study of the Combustion of Solitary Magnesium Particles in Air and in Carbon Dioxide[J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1994, 30(4): 431-436.
- [16] Shafirovich E Y, Goldshleger U I. The Superheat Phenomenon in the Combustion of Magnesium Particles[J]. *Combustion and Flame*, 1992, 88(3-4): 425-432.
- [17] Legrand B, Shafirovich E Ya, Marion M. Ignition and Combustion of Levitated Magnesium Particles in Carbon Dioxide[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1998, 27(2): 2413-2419.
- [18] Goroshin S, Higgins A, Lee J. Powdered Magnesium-Carbon Dioxide Propulsion Concepts for Mars Missions[C]. Los Angeles: 35th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2013.
- [19] Fournier V, Marcus P, Olefjord I. Oxidation of Magnesium[J]. *Surface and Interface Analysis*, 2002, 34(1): 494-497.
- [20] Abbud-Madrid A, Modak A, Branch M C, 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.
- [21] Rosenband V I, Vaganova N I. A Strength Model of Heterogeneous Ignition of Metal Particles[J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1992, 28(1): 1-7.
- [22] 李俊杰. 镁粉与二氧化碳点火燃烧特性研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.

(编辑:张 贺)