

文章编号: 1001- 2486(2010) 03- 0037- 05

固冲发动机补燃室凝相碳颗粒燃烧研究*

王德全, 夏智勋, 胡建新

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:应用改进的移动火焰锋面(MFF)模型,分析了环境压力、温度等参数对碳颗粒燃烧过程的影响。在此基础上,研究了固冲发动机补燃室内碳颗粒的燃烧过程,得到了固冲补燃室环境中的碳颗粒燃烧特性,并通过固冲直连式试验验证了数值模拟结果。结果表明:补燃室中大部分碳颗粒在进气道出口附近燃烧。

关键词:固体火箭冲压发动机; 燃烧; 数值模拟; 碳颗粒; 两相流

中图分类号: V438 **文献标识码:** A

Combustion Study of Condensed Carbon Particle in the Secondary Combustion Chamber of Solid Rocket Ramjet

WANG De-quan, XIA Zhi-xun, HU Jian-xin

(College Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The effect of pressure and temperature on carbon particle combustion was studied by an improved Moving Flame Front (MFF) model. On the basis of the above discussion, the carbon particle combustion in solid rocket ramjet was analyzed. As a result, the carbon particle combustion mechanism in solid rocket ramjet was achieved. Moreover, numerical results were validated by direct-connect test of solid rocket ramjet. The result shows that most of carbon particle in the secondary combustion chamber burned near the inlet exit.

Key words: solid rocket ramjet; combustion; numerical simulation; carbon particle; two phase flow

目前固体火箭冲压发动机所用的推进剂中,大多添加铝镁等金属成分,随着对推进剂能量特性要求越来越高,推进剂中金属含量也相应提高,随着金属含量的不断增加,AP的含量相对变小,从燃气发生器喷出的一次燃烧产物中将含有大量未燃烧完全的凝相碳,这部分物质在补燃室内与补燃空气充分掺混后可放出大量的热,其对流场的影响较大。因此,金属含量较高的情况下,需要对碳物质在补燃室中的燃烧过程进行分析。

关于碳颗粒燃烧模型的研究,已有不少研究^[1-5]报道,Nusselt^[1]、Burker^[2]以及Amoudson^[3]等先后提出了碳颗粒燃烧的单膜、双膜以及连续膜模型;章明川等^[4]对连续膜模型进行了改进,提出了移动火焰锋面(Moving Flame Front, MFF)模型;于娟等^[5]考虑了表面C与CO₂的还原反应,提出了改进的MFF模型。

本文应用改进的MFF碳颗粒燃烧模型,对固冲发动机环境中的碳颗粒燃烧时间以及影响因素进行了分析,并应用固冲发动机三维两相计算程序,对补燃室内凝相碳颗粒燃烧过程中相关参数随运行轨迹的变化进行了分析。

1 数学模型

1.1 碳颗粒燃烧模型

MFF模型认为碳表面只发生氧化反应,在一定条件下,小颗粒在气体边界层内也可以形成火焰,CO火焰在气体边界层内的位置可自动调节。改进的MFF模型在原来的基础上考虑了表面C与CO₂的还

* 收稿日期:2009- 12- 03

作者简介:王德全(1979-),男,博士生。

原反应,给出了包括还原反应和CO容积反应在内的碳颗粒燃烧反应速率的显式表达式,极大地方便了计算,应用改进的MFF模型可以分析各种工况下碳颗粒的燃烧状态和影响因素。改进的MFF模型的碳燃烧速率显式表达式可参见下面两式^[5]。其中, q_c 为碳颗粒单位表面燃烧速率($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$); R 为颗粒半径; L 为火焰锋面位置; $K_{d_{o_2}}$ 为氧气扩散速率系数; $K_{d_{co_2}}$ 为 CO_2 扩散速率系数; $K_{s_{o_2}}$ 为颗粒表面氧气扩散速率系数; $K_{s_{co_2}}$ 为颗粒表面 CO_2 扩散速率系数。

$K_{d_{o_2}} > K_{s_{o_2}}$ 时:

$$q_c = \frac{P_{g_{o_2}} + \frac{K_{s_{co_2}}}{K_{s_{o_2}}} P_{g_{co_2}}}{\frac{1}{K_{s_{o_2}}} + \frac{2}{K_{d_{o_2}}} - \frac{K_{s_{co_2}}}{K_{s_{o_2}} K_{d_{co_2}}}}$$

$K_{d_{o_2}} \leq K_{s_{o_2}}$ 时:

$$q_c = \frac{P_{g_{o_2}} + \frac{1}{K_{s_{o_2}}} + \frac{1}{K_{d_{o_2}}} \left(\frac{2}{K_{s_{co_2}}} + \frac{1}{K_{d_{co_2}}} \left(1 - \frac{K_{d_{o_2}}}{K_{s_{o_2}}} \right) \right) P_{g_{co_2}}}{\left(\frac{1}{K_{s_{o_2}}} + \frac{1}{K_{d_{o_2}}} \right) \left[1.5 - 0.5 \left(\frac{1 + \frac{K_{d_{o_2}}}{K_{s_{o_2}}}}{1 + \frac{2K_{d_{co_2}}}{K_{s_{co_2}}} - \frac{K_{d_{o_2}}}{K_{s_{o_2}}}} \right) \right]}$$

关于改进的MFF模型的详细介绍可参见文献[5]。

1.2 两相流场相关模型

气相流体三维N-S控制方程的简化形式为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S_\phi$$

对于上式各项的具体含义,可参见文献[6]。发动机中的凝相颗粒运动方程为:

$$\frac{d\mathbf{X}_p}{dt} = \mathbf{V}_p$$

$$\frac{d\mathbf{V}_p}{dt} = \mathbf{F}_p + \mathbf{F}$$

$$\mathbf{F}_p = \frac{3}{4} \frac{c_D \rho}{\rho_p d_p} (\mathbf{V} - \mathbf{V}_p) |\mathbf{V} - \mathbf{V}_p|$$

$$c_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} \left(1 + \frac{1}{6} Re_p^{\frac{2}{3}} \right) & Re_p < 1000 \\ 0.44 & Re_p \geq 1000 \end{cases}$$

式中, \mathbf{X}_p 为颗粒位置矢量, \mathbf{V}_p 是粒子相的速度矢量, \mathbf{F} 为颗粒所受其它外力,包括stefan流、压力梯度作用和体积力, \mathbf{F}_p 是单位质量颗粒所受的阻力, \mathbf{V} 是气相的速度矢量, c_D 是曳力系数, Re_p 是颗粒雷诺数。

在计算碳颗粒在补燃室内的燃烧流动时,相关的计算条件如下:

计算的发动机构型采用单喷孔-四进气道进气构型,空气总流量为 8kg/s ,空气来流总温为 573K ,空燃比取设计状态值8,燃气流量由空气流量和空燃比确定,燃气温度由热力计算得到,为 2189K 。

补燃室入口凝相组分由热力计算程序得到,入口粒子有:铝、氧化铝以及碳颗粒,由于其他凝相含量较小,这里将其忽略不计。铝液滴在运动过程中的燃烧模型可参见文献[7]。

采用涡团耗散模型(Eddy Dissipation Model, EDM)来模拟气相的湍流燃烧。连续相流体的湍流流动

采用 $k-\varepsilon$ 双方程模型来模拟; 采用“随机轨道模型”来模拟颗粒在运动过程中的燃烧、湍流扩散等过程。计算中采用有限体积法对所建立的三维两相湍流燃烧 N-S 方程进行差分离散, 扩散项采用中心差分格式离散, 对流项采用一阶迎风格式离散, 采用标准的压力插值格式, 应用 SIMPLE 算法对离散方程进行求解。

1.3 粒径分布以及粒子边界条件处理

- (1) 氧化铝粒径分布: 采用“三峰”分布, 三组颗粒平均直径分别为 $1.5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 和 $140\mu\text{m}$, \lg 标准差为 0.46。
- (2) 铝粒径分布: 需推进剂配方以及其他性能参数而定, 这里采用的铝粒子尺寸为 $30\mu\text{m}$;
- (3) 碳颗粒粒径分布: 由于碳不像氧化铝那样容易结团而形成大粒子, 因此这里仅考虑小粒径的碳颗粒燃烧过程, 采用平均粒径为 $10\mu\text{m}$ 、 \lg 标准差为 0.46 的单峰正态分布;
- (4) 粒子壁面边界处理: 由于暂不考虑粒/壁碰撞的具体过程, 因此粒子撞击到壁面后粒子轨道即终止。

2 结果分析

2.1 碳颗粒燃烧规律分析

颗粒直径 $50\mu\text{m}$, CO_2 分压 0.5atm, 环境温度 2000K 时, 对 O_2 分压分别为 0.5atm、1atm、1.5atm、2atm 下的碳颗粒燃烧时间进行了估算, 结果如图 1 所示。其中无量纲燃烧时间 $\tau = \rho_g D_g t / \rho_s R_s^2$, ρ_g 、 D_g 分别为燃气流密度和扩散系数, ρ_s 、 R_s 分别为颗粒密度和半径。当氧气分压较低时, 碳颗粒燃烧时间相对较长; 随着氧气含量增加, 燃烧时间急剧缩短, 颗粒直径迅速变小。由此可见, 环境氧气分压对碳颗粒的燃烧过程影响很大。从变化趋势来看, 当氧气分压达到一定程度后, 再增加氧气含量, 颗粒燃烧时间变化不大。这是因为随着氧气含量由小变大, 颗粒燃烧经历了由贫氧到富氧的过程, 当氧气达到燃烧饱和状态后, 颗粒燃烧速率受氧气扩散控制逐渐转变为受表面氧化反应速率控制。

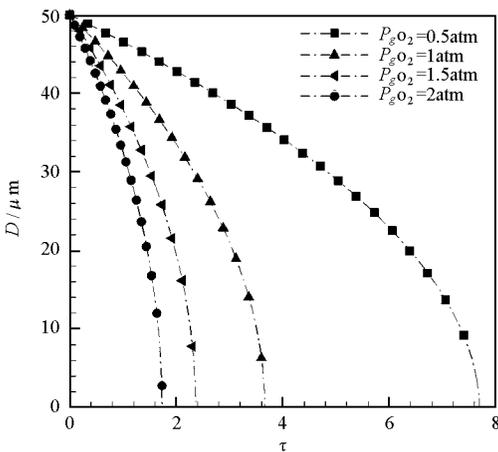


图 1 不同氧分压下的碳颗粒燃烧时间
Fig. 1 Combustion time under different oxygen partial pressure

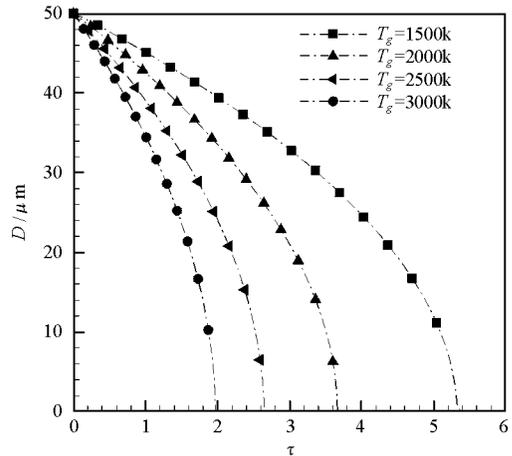


图 2 环境温度对燃烧时间的影响
Fig. 2 Combustion time under different ambient temperature

颗粒直径 $50\mu\text{m}$, O_2 分压 1atm, CO_2 分压 0.5atm, 对环境温度分别为 1500K、2000K、2500K、3000K 下的碳颗粒燃烧时间进行了估算, 结果如图 2 所示。环境温度逐渐升高, 碳颗粒燃烧时间依次减小, 且减小幅度逐渐变缓, 与图 1 对比可发现, 环境温度对燃烧时间的影响没有氧分压影响剧烈。

图 3 为颗粒初始直径为 $10\mu\text{m} \sim 70\mu\text{m}$ 时碳颗粒初始燃烧速率变化。其中 q' 为参考速率, $q' = D_{orf} / [2\rho_g D_g]$, 这里参考初始直径 D_{orf} 取为 $40\mu\text{m}$, ρ_g 为气体密度, D_g 为气体扩散系数。环境温度为 2000K, O_2 分压为 1atm, CO_2 分压为 0.5atm。随着颗粒初始直径不断增大, 颗粒初始燃烧速率逐渐减小。由此

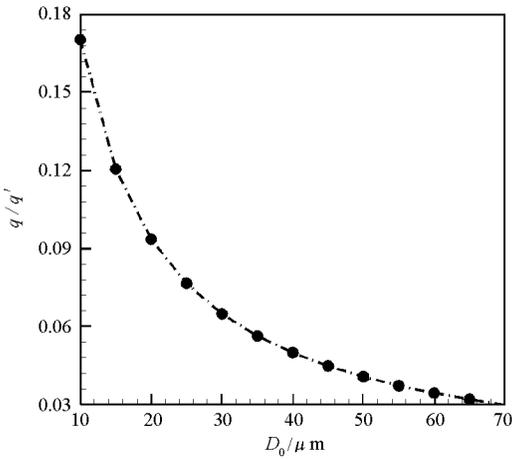


图3 初始燃烧速率随初始粒径变化
Fig. 3 Initial combustion rate under different initial size

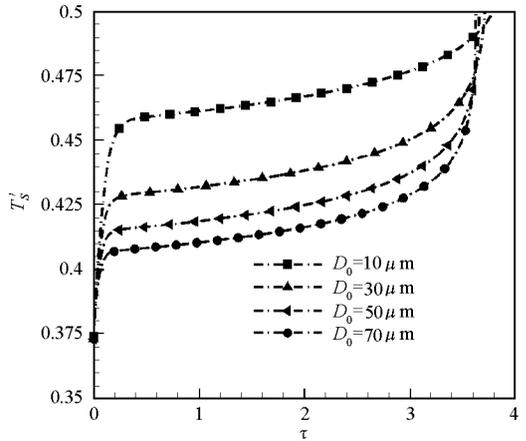


图4 不同初始粒径下颗粒温度变化
Fig. 4 Particle temperature under different initial size

可见, 颗粒在燃烧过程中, 随着颗粒直径的不断减小, 其燃烧速率也将不断增大。

环境温度为 2000K, O_2 分压为 1atm, CO_2 分压为 0.5atm, 对颗粒初始直径分别为 10 μ m、30 μ m、50 μ m、70 μ m 下碳颗粒温度随时间的变化进行了分析, 结果如图 4 所示。其中无量纲温度 $T'_s = T_s M_{CO_2} c_p / M_{CO} H_{CO}$, M_{CO_2} 为 CO_2 分子量, M_{CO} 为 CO 分子量, H_{CO} 为单位质量 CO 的反应热, c_p 为碳颗粒等压比热。随着颗粒燃烧的进行, 颗粒温度在着火后迅速上升, 至某一稳定温度后, 燃烧进入稳定燃烧阶段, 颗粒温度缓慢上升。至燃烧临近结束时, 颗粒温度再一次迅速升高。初始粒径较小的颗粒, 其稳定燃烧阶段温度要比大粒径的温度高, 由上文知, 初始粒径越小, 颗粒初始燃烧速率越大, 单位面积上积聚的燃烧反馈热就越多, 因此温度就越高。

图 5 为颗粒初始直径分别为 10 μ m、30 μ m、50 μ m、70 μ m 下的碳颗粒表面附近火焰锋面温度随燃烧时间的变化, 环境温度 2000K, O_2 分压 1atm, CO_2 分压 0.5atm。燃烧开始时, 火焰锋面温度先是迅速下降, 至最低点后稳步上升, 燃烧结束时, 锋面温度迅速上升。初始粒径越大, 总体上燃烧火焰的锋面温度越低。

2.2 固冲发动机补燃室内碳燃烧过程

图 6 为直径 $D = 12\mu$ m 的碳颗粒在补燃室内燃烧过程中粒径变化。碳颗粒燃烧呈现两个不同的区域: 位于补燃室轴线附近的碳颗粒燃烧缓慢, 在尾喷管出口处还未燃尽, 整个燃烧过程中变化较小; 而远离中心轴线靠近壁面的碳颗粒在进气道空气出口附近即已燃烧完全。造成这种不同的燃烧差异的原因主要是补燃室内氧化气体分布不同所致, 氧气在靠近壁面区域浓度较高, 而中心轴线附近则很低, 因此轴线附近的碳颗粒因为供氧不足而无法完全燃烧。由此可见, 即便是粒径较大的碳颗粒能够到达壁面附近, 由于氧气充足, 在到达壁面时碳颗粒也已经燃烧殆尽, 因此碳颗粒对壁面的沉积作用影响不大; 但是由于碳颗粒主要是在靠近壁面燃烧而非轴线燃烧, 因此碳颗粒的燃烧对壁面绝热材料的烧蚀影响较大。

另外还可发现, 在发动机头部区域, 碳颗粒粒径变化缓慢, 然而经过进气道出口空气的掺混后, 迅速反应, 粒径迅速变小。由此可见, 补燃室内氧化气体的浓度分布是影响碳颗粒燃烧的首要因素, 温度对其燃烧的影响则相对较弱。

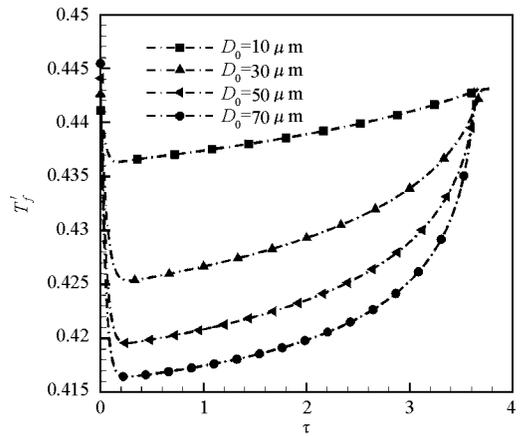


图5 火焰锋面温度随燃烧时间的变化
Fig. 5 Flame front temperature under different combustion time

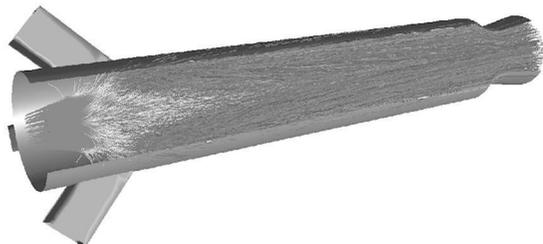


图6 直径 $D=12\mu\text{m}$ 的碳颗粒在补燃室内燃烧过程中粒径变化

Fig. 6 Particle diameter distribution for $D=12\mu\text{m}$ in secondary chamber

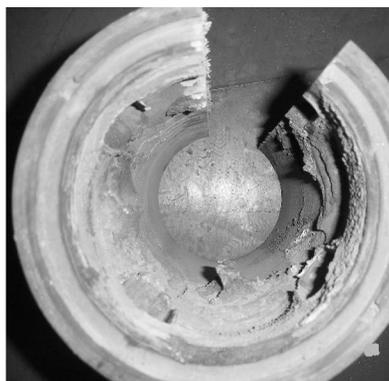


图7 某发动机沉积分布图

Fig. 7 Deposition distribution after test

2.3 试验分析

由于试验手段所限,这里未能对碳颗粒的燃烧过程进行准确观测,但是我们对某构型发动机试验结束后的粒子沉积分布进行了分析,通过得到的沉积情况,可以间接的验证碳颗粒在补燃室内的燃烧情况。图7为试验结束后得到的沉积分布实景图。从沉积分布上看,在进气道出口附近区域,存在明显的黑色沉积物,此部分为未完全燃烧的碳颗粒沉积形成的,而下游区域这样的碳沉积则相对较少,这与我们数值计算得到的碳颗粒沉积分布区域比较一致,因此,采用本文的计算方法来分析固冲发动机补燃室中的碳颗粒燃烧规律是合适的。

3 结论

本文对固冲发动机环境中的碳颗粒燃烧时间以及影响因素进行了分析,得到的结论如下:

- (1) 环境氧分压对碳颗粒的燃烧过程影响很大,增大环境氧分压,可明显减少燃烧时间;
- (2) 增加环境温度,有助于减少燃烧时间;
- (3) 颗粒燃烧开始与结束时燃烧速率变化剧烈;

(4) 在固冲发动机中,大部分碳颗粒在进气道出口附近掺混过程中燃烧殆尽;周向上,由于氧浓度分布的差异,碳颗粒在壁面附近的燃烧效率比中心轴线附近的大。

参考文献:

- [1] Nusselt W Z. The Process of Combustion in Powdered Coal Firing[J]. Z. Ver. Deut. Ing., 1924, 68: 124- 128.
- [2] Burke S P, Schuman T E W. The Mechanism of Combustion of Solid Fuel[C]//Proc. Int. Conf. Bituminous Coal, 1932, 2: 485- 509.
- [3] Amundson N R, Mon S. Diffusion and Reaction in Carbon Burning in Dynamics and Modeling of Reactive Systems[M]. Academic Press, New York, 1980: 353- 374.
- [4] 章明川,徐旭常. CO 气相反应对碳颗粒燃烧的影响—连续膜理论的一种简化模拟方法[J]. 工程热物理学报, 1990, 11: 438- 443.
- [5] 于娟. 挥发分、CO 火焰与炭粒燃烧的相互作用及其模块化[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.
- [6] 胡建新. 含硼推进剂固体火箭冲压发动机补燃室工作过程研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
- [7] 缪万波, 夏智勋, 方丁酉, 等. 金属/水反应冲压发动机三维内流场数值模拟[J]. 固体火箭技术, 2007, 30(2): 102- 105.
- [8] 王德全, 夏智勋, 胡建新, 等. 固冲发动机沉积数值模拟与试验研究[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(1): 38- 42.