

硼颗粒聚团着火过程研究

方传波¹, 夏智勋^{1,*}, 胡建新², 王德全¹, 游进¹

1. 国防科学技术大学 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 湖南 长沙 401173

2. 国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 401173

摘要: 针对含硼推进剂固体火箭冲压发动机内硼颗粒聚团的着火过程开展了系统研究, 考虑硼颗粒聚团内部气相扩散及颗粒聚团与周围环境的传热传质过程, 建立了一维硼颗粒聚团着火模型, 详细分析了环境总压、环境气体温度、氧气摩尔分数、聚团半径、聚团孔隙率以及硼颗粒粒径对硼颗粒聚团的着火温度和着火延迟时间的影响规律。结果表明: 硼颗粒聚团能够在比单颗粒硼着火温度更低的环境温度下实现着火, 且着火温度随聚团半径、氧气摩尔分数的增加而降低, 随环境总压、聚团孔隙率以及硼颗粒粒径的增加而增大; 硼颗粒聚团着火延迟时间随环境气体温度、氧气摩尔分数和颗粒聚团孔隙率的增加而减小, 随硼颗粒粒径的增加而增大。在较高的环境总压下, 硼颗粒聚团的着火延迟时间随环境总压增加而增大。

关键词: 固体火箭冲压发动机; 硼颗粒; 着火模型; 着火温度; 着火延迟时间

中图分类号: V431 **文献标识码:** A

硼以其高的质量热值和体积热值成为富燃料推进剂的首选。为改进硼的力学性能和工艺, 含硼富燃料推进剂中常采用团聚硼, 在燃气发生器和补燃室中, 团聚硼中的粘合剂首先分解, 部分团聚硼依然保持聚团外形, 其内部硼颗粒之间存在空隙, 气体仍可以流通^[1]。文献[2]的研究也表明, 小粒度的硼颗粒在进入补燃室前会经历结团过程, 形成团聚体, 其内部的硼颗粒之间也存在空隙, 它们以聚团形式进入补燃室。另外, 在高金属含量粉末冲压发动机^[3]和固体火箭冲压发动机^[4]工作过程中, 硼颗粒在气流湍流和颗粒间相互作用下也可能形成局部高颗粒相密流区, 甚至聚集成团参与多相掺混反应。同时, 该聚团又随时可能在气动力、颗粒碰撞力等作用下与其他颗粒聚集或破碎成更多小颗粒聚团^[5]。硼颗粒聚团的存

在改变了多相之间的动力关系, 影响了多相之间以及颗粒自身的传热传质和化学反应过程, 不同于分散单颗粒硼的着火燃烧过程, 因此, 有必要开展硼颗粒聚团的着火特性研究。

Karadimitris 等^[6]的研究表明, 硼颗粒离开推进剂表面进入燃烧室时趋于聚合结团形式, 且燃烧时间比单颗粒硼明显加长。Gurevich 等^[7]在开展硼颗粒燃烧试验研究时发现, 单颗粒硼很容易聚合成更大的硼颗粒团, 且硼颗粒聚团的着火温度随聚团半径的增加而降低。Zolotko 等^[8-9]基于热爆炸理论的稳态分析法得到了硼颗粒聚团的着火温度随聚团半径的变化规律。国内对硼颗粒及其衍生物的着火过程研究基本仍以借鉴国外成果为主。而 Zolotko 等国外研究人员大都基于稳态法, 尚未对硼颗粒聚团的整个着火过程进行

收稿日期: 2011-12-20; 退修日期: 2012-02-10; 录用日期: 2012-03-13; 网络出版时间: 2012-03-22 16:44

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20120322.1644.006.html

基金项目: 国家自然科学基金(51276194)

* 通讯作者. Tel.: 0731-84576450 E-mail: xiazhixun@sina.com

引用格式: Fang C B, Xia Z X, Hu J X, et al. Study of ignition process of boron particle agglomeration. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(12): 2153-2160. 方传波, 夏智勋, 胡建新, 等. 硼颗粒聚团着火过程研究. 航空学报, 2012, 33(12): 2153-2160.

系统分析,也未对环境总压、氧化性气体浓度、着火延迟时间等参数对硼颗粒聚团着火过程的影响展开研究,这些参数都直接影响冲压发动机内硼的能量释放方式和效率。

在上述背景下,以硼颗粒聚团为研究对象,考虑硼颗粒聚团内部气相扩散及颗粒聚团与周围环境的传热过程,建立了一维球形硼颗粒聚团着火模型,详细分析了环境气体温度、氧气摩尔分数、环境总压和聚团孔隙率等参数对硼颗粒聚团着火的影响。

1 物理数学模型

硼颗粒聚团着火过程物理模型如图 1 所示,现考虑氧气和氮气混合物中半径为 R_a 的球形硼颗粒聚团,其中均匀分布着初始直径、初始温度相等的硼颗粒,且硼颗粒本身也为球形。就整个颗粒聚团而言,气相反应物和生成物可通过硼颗粒间隙所组成的孔隙网络进行扩散;就硼颗粒而言,在相对较低的环境气体温度中,硼颗粒与氧气的反应主要表现为氧气扩散吸附在硼颗粒表面,然后通过液态 B_2O_3 氧化层扩散到硼与氧化层的交界面上,并在交界面上与硼发生氧化反应产生 B_2O_3 ,反应符合缩核模型^[10]。

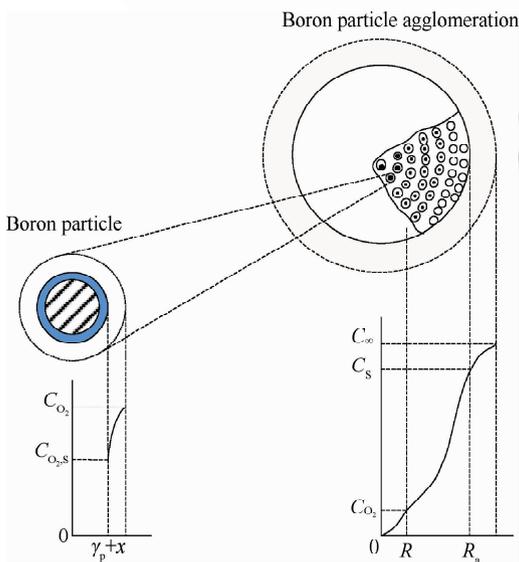
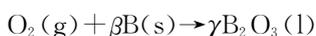


图 1 硼颗粒聚团着火过程物理模型

Fig. 1 Physical model of ignition process of boron particle agglomeration

硼与氧气的化学反应式为



式中:化学当量比 $\beta = 4/3$ 、 $\gamma = 2/3$ 。

为便于模型的建立,将硼颗粒聚团的着火过程简化,采用以下基本假设:

1) 表征氧气在硼颗粒聚团内部扩散时采用准稳态近似。

2) 硼颗粒导热性能远高于气体,因此认为着火过程中硼颗粒聚团温度始终均匀一致。

3) 忽略硼颗粒聚团外部气相组分边界层扩散阻力。

4) 忽略硼颗粒聚团外表面处 Stefan 流影响。

氧气组分质量守恒方程为

$$D_{O_2,e} \nabla^2 C_{O_2} = \dot{\omega}_{O_2} \quad (1)$$

式中: $\dot{\omega}_{O_2}$ 为聚团内部单位体积中氧气摩尔消耗量; $D_{O_2,e}$ 为氧气有效扩散系数^[11],近似取 $D_{O_2,e} = D_{O_2,N_2} \cdot \epsilon$, ϵ 为孔隙率; C_{O_2} 为氧气浓度。

由于着火阶段硼颗粒直径基本不变^[10],且 $x/r_p \ll 1$,进一步假设着火阶段硼颗粒聚团的孔隙率基本不变。若颗粒聚团内部含有 n 个硼颗粒,则颗粒聚团孔隙率为

$$\epsilon = 1 - n \frac{(r_p + x)^3}{R_a^3} = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_B} \quad (2)$$

式中: ρ_a 和 ρ_B 分别为硼颗粒聚团和硼颗粒的密度; r_p 和 x 分别为硼颗粒半径和氧化层厚度。

根据经典的缩核模型理论,硼颗粒聚团单位体积各硼颗粒氧化反应面积之和为^[12]

$$S_{O_2}(R) = (1 - \epsilon) (A_p/V_p) [r_p/(r_p + x)]^{F_p - 1} \quad (3)$$

式中: A_p 和 V_p 分别为硼颗粒外表面积和体积; F_p 为形状因子,球形取为 3。

硼颗粒聚团单位体积中各硼颗粒表面蒸发面积之和为

$$S_{\text{evap}}(R) = (1 - \epsilon) (A_p/V_p) = \frac{3}{r_p + x} (1 - \epsilon) \quad (4)$$

氧气扩散系数为

$$D_{O_2,N_2} = \frac{1 \times 10^{-3} \times \bar{T}^{1.75} \times \sqrt{1/M_{O_2} + 1/M_{N_2}}}{\left[\left(\sum_{O_2} v_i \right)^{1/3} + \left(\sum_{N_2} v_i \right)^{1/3} \right]^2 p} \quad (5)$$

式中: p 为环境总压; \bar{T} 为气体所处环境温度; M_{O_2} 和 M_{N_2} 分别为氧气和氮气的摩尔分子量; $\sum_{O_2} v_i = 16.6$ 、 $\sum_{N_2} v_i = 17.9$ 分别为氧气和氮

气的分子扩散体积,代入式(5)可得

$$\rho D_{O_2, N_2} = 9.69 \times 10^{-6} \bar{T}^{1.75} \quad (6)$$

着火阶段,同文献[13]的处理方法,取 $\bar{T} = \sqrt{T_a T_{gas}}$, T_a 和 T_{gas} 分别为硼颗粒聚团和周围环境气体温度,则式(1)即为

$$D_{O_2, e} \left(\frac{\partial^2 C_{O_2}}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial C_{O_2}}{\partial R} \right) = - \frac{\rho_B}{\beta M_B} \cdot \frac{\partial r_p}{\partial t} S_{O_2}(R) \quad (7)$$

其中:

$$\frac{\partial r_p}{\partial t} = - \frac{R_{B, O_2} M_B}{\rho_B 4\pi r_p^2} \quad (8)$$

$$R_{B, O_2} =$$

$$\frac{64.8 \times 10^{-8} (r_p + x)^2 T_p e^{-22600/T_p} C_{O_2, s} R_u T'_{gas}}{x} \quad (9)$$

式中: R_{B, O_2} 为硼与氧反应的摩尔消耗速率; M_B 为硼的摩尔分子量; R_u 和 T'_{gas} 分别为通用气体常数和硼颗粒周围气相温度; $C_{O_2, s}$ 为硼颗粒表面氧气浓度。

硼颗粒聚团能量守恒方程为

$$\rho_a c_{p, a} V_a \frac{dT_a}{dt} = \int_0^{R_a} Q_{O_2} \frac{R_{B, O_2}}{4\pi r_p^2} S_{O_2} 4\pi R^2 dR - \int_0^{R_a} \Delta H_{vap} R_{evap} S_{evap} 4\pi R^2 dR + 4\pi R_a^2 \cdot [h(T_{gas} - T_a) + \sigma \epsilon_B (T_{wall}^4 - T_a^4)] \quad (10)$$

式中: $c_{p, a}$ 和 V_a 分别为硼颗粒聚团的比热和体积; Q_{O_2} 为消耗单位摩尔硼释放的热量; ΔH_{vap} 为蒸发单位摩尔氧化层消耗的热量; h 为对流换热系数; T_{wall} 为环境辐射温度,取 $T_{wall} = T_{gas}$; ϵ_B 为硼颗粒辐射吸收系数; σ 为波尔兹曼常数; R_{evap} 为硼颗粒表面氧化层的摩尔蒸发速率,由蒸发动力和气相扩散阻力共同控制,其表达式为

$$R_{evap} = \frac{1.005 \times 10^{10} (r_p + x)^2 \alpha e^{-44000/T_p}}{T_p^{0.5} \left[1 + 4.5 \times 10^7 \frac{\alpha p (r_p + x)}{2T_p} \right]} \quad (11)$$

式中: α 为 B_2O_3 的蒸发系数; T_p 为聚团内部硼颗粒的温度。由于单颗粒硼着火时颗粒自身温度在 2000 K 左右,在此温度下, B_2O_3 的饱和蒸汽压力很小,据此认为 B_2O_3 的蒸发不影响氧气的扩散过程^[14]。

硼颗粒表面氧化层消耗控制方程为

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{(R_{B, O_2} / 2 - R_{evap}) M_{B_2O_3}}{4\pi r_p^2 \rho_{B_2O_3}} \quad (12)$$

式中: $M_{B_2O_3}$ 为 B_2O_3 的摩尔分子量。由于忽略了

Stefan 流影响,则氧气由硼颗粒聚团表面向内部扩散的摩尔流率等于颗粒聚团内部化学反应消耗氧气的总摩尔流率,即

$$\int_0^{R_a} \frac{1}{\beta} \cdot \frac{R_{B, O_2}}{4\pi r_p^2} S_{O_2} 4\pi R^2 dR = D_{O_2, e} S_a \frac{\partial C_{O_2}}{\partial R} \Big|_{R=R_a} \quad (13)$$

式中: S_a 为聚团外表面积。做进一步近似:

$$\rho_a c_{p, a} V_a \frac{dT_a}{dt} \approx n \left(\frac{4}{3} \pi r_{p, i}^3 \rho_{B, B(s)} c_{p, B(s)} + 4\pi r_{p, i}^2 x_i \rho_{B_2O_3} c_{p, B_2O_3(l)} \right) \frac{dT_a}{dt}$$

式中: $r_{p, i}$ 和 $c_{p, B(s)}$ 分别为硼颗粒的初始半径和比热; x_i 、 $\rho_{B_2O_3}$ 和 $c_{p, B_2O_3(l)}$ 分别为氧化层初始厚度、密度和比热。式(10)可化为

$$n \left(\frac{4}{3} \pi r_{p, i}^3 \rho_{B, B(s)} c_{p, B(s)} + 4\pi r_{p, i}^2 x_i \rho_{B_2O_3} c_{p, B_2O_3(l)} \right) \frac{dT_a}{dt} = Q_{O_2} \beta D_{O_2, N_2} \epsilon 4\pi R_a^2 \frac{\partial C_{O_2}}{\partial R} \Big|_{R=R_a} - \int_0^{R_a} \Delta H_{vap} R_{evap} S_{evap} 4\pi R^2 dR + 4\pi R_a^2 \cdot [h(T_{gas} - T_a) + \sigma \epsilon (T_{wall}^4 - T_a^4)] \quad (14)$$

2 边界条件和计算方法

由硼颗粒聚团内部温度均匀分布假设得

$$T_a = T'_{gas} = T_p \quad (15)$$

忽略硼颗粒周围边界层的扩散阻力,则

$$C_{O_2, s} = C_{O_2} \quad (16)$$

边界条件为 $t \geq 0$ 时:

$$R = 0, \quad \frac{\partial C_{O_2}}{\partial R} = 0 \quad (17)$$

$$R = R_a, \quad C_{O_2} = C_s = C_\infty \quad (18)$$

式中: C_s 和 C_∞ 分别为聚团外表面和环境空气中氧气浓度, $C_\infty = p x_{O_2} / (R_u T_{gas})$, x_{O_2} 为环境中氧气摩尔分数。

式(7)空间离散采用二阶中心差分格式,式(14)时间离散采用一阶显示格式,时间步长取足够小使得聚团内部同一位置处氧气浓度在相邻时间步内变化不大于 5%,以此保证单颗粒硼着火过程的准稳态计算。

边界条件式(13)、式(17)中 $\partial C_{O_2} / \partial R$ 采用二阶迎风格式离散近似。利用经典的四阶龙格库塔法联立求解式(8)、式(12)及式(15)和式(16),即可得到着火过程中聚团内部不同位置处单颗粒硼的参数变化。

仅考虑环境气流静止情况,取: $h = Nu\lambda_{\text{gas}} / (2R_a)$, $\lambda_{\text{gas}} = 820.61 \times 10^{-4} (T_{\text{gas}}/1273)^{0.75}$, $x_i = 0.01 \mu\text{m}$, $M_B = 10.82$, $M_{\text{B}_2\text{O}_3} = 69.64$, $c_{p,\text{B(s)}} = 2130 + 0.294T_p$, $c_{p,\text{B}_2\text{O}_3(\text{D})} = 1.84 \times 10^3$ 。式中: λ_{gas} 为气体导热系数; Nu 为努赛尔数,环境气流静止时取 $Nu = 2$,其他主要参数如表 1 所示,所用参数均采用国际单位制。

表 1 其他主要计算参数

Table 1 Main parameters of the calculation

Parameter	Value
ϵ_B	0.84
α	0.04
$\rho_{\text{B}_2\text{O}_3} / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1850
$Q_{\text{O}_2} / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	611272.8
$\Delta H_{\text{evap}} / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	378000
$\rho_B / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2340

3 结果与讨论

3.1 算例验证和分析

为考查计算过程的准确性,与文献[7]的试验结果进行了对比验证,给出了硼颗粒聚团着火所需临界环境气体温度(以下简称着火温度)与硼颗粒聚团半径间的关系,如图 2 所示。经过大量计算表明,在本文研究工况范围内,单颗粒硼的着火延迟与硼颗粒聚团的着火延迟相比很小,因此,以下近似认为硼颗粒聚团内部某一单颗粒硼表面氧化层耗尽着火即为整个硼颗粒聚团着火成功。

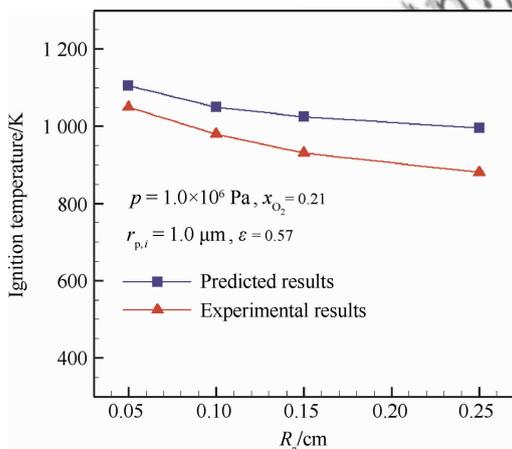


图 2 计算所得着火温度与试验结果对比

Fig. 2 Predicted ignition temperatures compared with experimental results

由图 2 可见,本文计算所得硼颗粒聚团的着火温度与试验测量值吻合较好,两者随硼颗粒聚团半径的变化趋势也基本一致,说明本文研究方法基本可信。

从图 2 还可以看出,硼颗粒聚团着火温度比发动机用单颗粒硼着火温度(1600~1900 K)低很多,且随颗粒聚团半径的增大而减小。这是由于孔隙率一定时,聚团内硼颗粒总的氧化反应面积随聚团半径的增加而加大,但聚团单位体积的外表面传热面积与单颗粒硼相比很小且随聚团半径的增大而降低,因此,硼颗粒聚团内部的热量更容易累积,造成聚团能够在更低环境温度下实现着火。另外,图中计算值与试验值的差距随硼颗粒聚团半径的增加而略微加大,这可能是忽略硼颗粒聚团外表面 Stefan 流所致。

3.2 着火过程分析

硼颗粒聚团着火过程中温度随时间的变化曲线如图 3 所示。由图分析可知,硼颗粒聚团在外界传热作用下缓慢升温,其内部硼颗粒也随温度的上升与氧气发生化学反应,并释放出一定的热量。随着反应的进行,硼颗粒聚团与周围环境的温差逐渐减小,两相间传热强度减弱,颗粒聚团升温速率降低。当颗粒聚团与周围环境温度相当时,若环境温度足够高,硼颗粒聚团整体的氧化放热速率高于散热速率,则聚团在氧化反应自加热作用下降温速率开始加速,直至其内部硼颗粒表面氧化层耗尽实现着火;若环境温度较低,则氧化反应

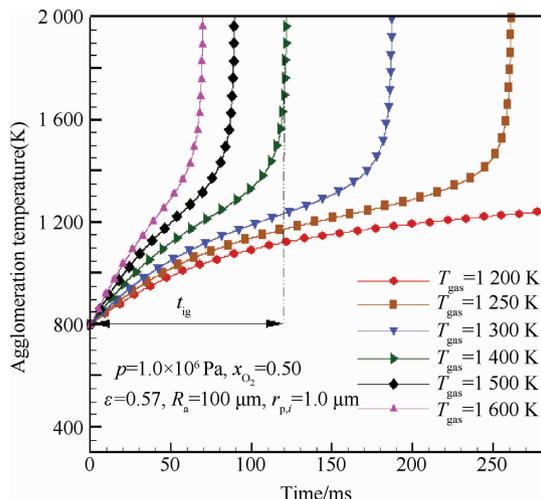


图 3 聚团温度随时间变化

Fig. 3 Agglomeration temperature vs time

未能加速, 硼颗粒聚团在氧化放热和散热共同作用下最终进入一个反应速率很小的稳态氧化过程, 从而未能实现着火。由图还可看出, 环境温度越高, 硼颗粒聚团的着火延迟时间 t_{ig} 越小。

图 4 给出了初温 800 K 的硼颗粒聚团在较高环境温度下实现着火过程中聚团内部相对氧气浓度值 $\bar{C}_{O_2} = C_{O_2}/C_{\infty}$ 的分布随时间的变化曲线。结合图 3 可以发现, 在初始时间段内, 由于硼颗粒聚团温度相对较低, 其内部各单颗粒硼的化学反应缓慢, 外界氧气向颗粒聚团内部扩散过程中消耗量较小, 氧气浓度沿硼颗粒聚团径向分布基本一致。但是, 随着硼颗粒聚团温度的上升, 单颗粒硼的氧化反应加速, 氧气向聚团内部扩散过程中消耗量加大, 氧气浓度沿硼颗粒聚团径向由外向内逐渐递减。当聚团温度上升至某一值时, 硼颗粒对氧气的消耗量加大, 聚团表面附近氧气浓度梯度急剧增大, 聚团内部的硼表面氧化层迅速消耗从而实现着火。经大量计算表明, 当环境中氧气浓度更高或更低时, 硼颗粒聚团内部氧气浓度分布也会经历类似的变化过程, 即颗粒聚团表面附近氧气浓度梯度随时间逐渐加大。

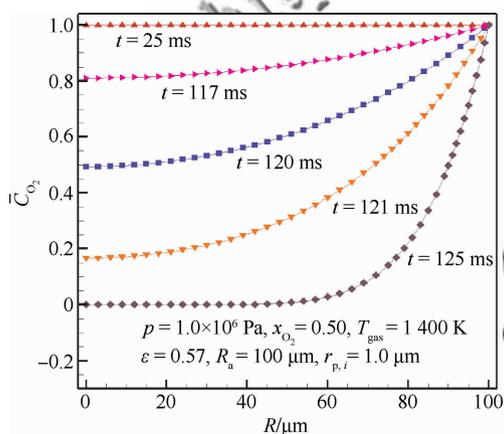


图 4 实现着火时聚团内部相对氧气浓度分布

Fig. 4 Relative oxygen concentration distributions in agglomeration for successful ignition

图 5 给出了初温 800 K 的硼颗粒聚团在较低环境温度下未能实现着火时聚团内部氧气浓度分布随时间的变化曲线。结合图 3 和图 4 可以发现, 在此环境气体温度下, 随着硼颗粒聚团温度的上升, 氧化反应缓慢加速, 沿聚团径向方向的氧气浓度梯度也随之逐渐加大, 但该条件下氧化放热始终未能使硼颗粒聚团达到升温加速阶段, 聚团最终进入缓慢的氧化过程, 从而未能实现着火。

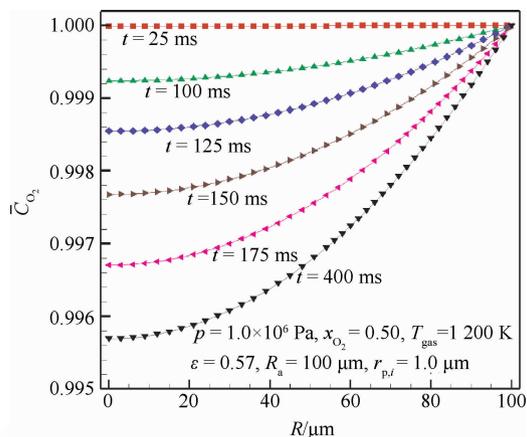


图 5 未能实现着火时聚团内部相对氧气浓度分布

Fig. 5 Relative oxygen concentration distributions in agglomeration for degenerate ignition

3.3 氧气摩尔分数和环境总压的影响

图 6 给出了初温 800 K 的硼颗粒聚团着火温度与环境总压、氧气摩尔分数的关系。由图可见, 同一环境总压下, 着火温度随环境中氧气摩尔分数增加而降低; 而氧气摩尔分数相同时, 着火温度随环境总压增加而增大。分析认为, 当环境中氧气摩尔分数增加时, 氧化放热速率加大, 硼颗粒聚团的热量更易累积, 因而更容易在较低温度下实现着火; 当环境总压增高时, 硼颗粒氧化层生成速率增加, 蒸发速率下降, 而氧气向聚团内部的扩散速率又随压力的增加而降低, 三者共同作用造成聚团内部的硼颗粒表面氧化层增至某一值后硼

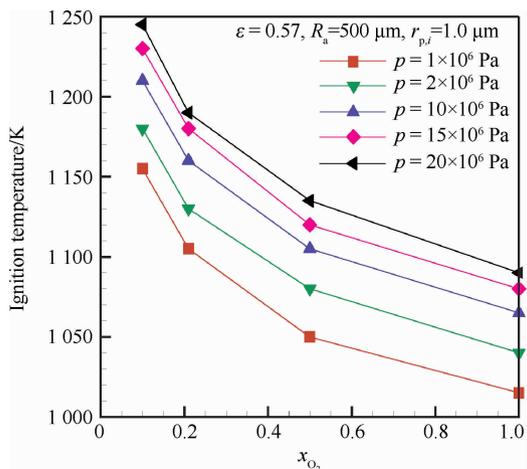


图 6 着火温度随氧气摩尔分数和环境总压的变化

Fig. 6 Ignition temperature vs oxygen mole fraction for various total ambient pressures

的氧化速率逐渐趋于稳定,因此,需要更高的环境温度实现着火。

图7给出了初温800 K的硼颗粒聚团在1500 K环境温度中不同氧气摩尔分数和环境总压下着火延迟时间的变化规律。由图可见,硼颗粒聚团着火延迟时间随环境中氧气摩尔分数增加而降低,且环境总压越高,降低幅度越大;当氧气摩尔分数较高时,着火延迟时间随压力变化不大;当氧气摩尔分数较低时,在较高压力下着火延迟时间随压力上升而增加,但在较低压力下着火延迟时间基本不变,甚至随压力上升而有所下降。分析认为,当外界环境达到着火条件时,较低的环境总压使得氧气向硼颗粒聚团内部扩散速率较大,因此,增加氧气分压将增大硼颗粒聚团的升温速率,进而减小着火延迟时间。但是,随着环境总压的增大,氧气向内扩散速率降低,着火延迟时间又随环境总压的增加而加大。

使整个硼颗粒聚团总的氧化反应面积降低,造成氧化放热量有限,不利于硼颗粒聚团内部热量的累积,从而导致着火不易发生。

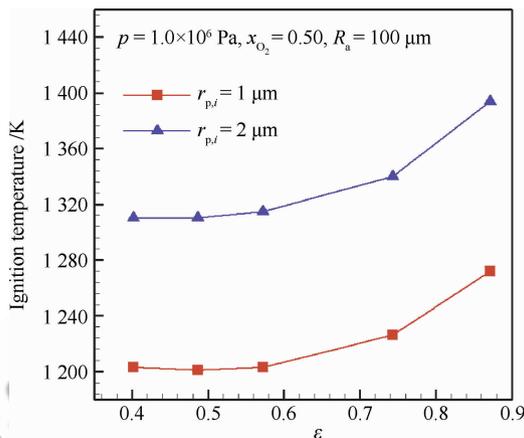


图8 着火温度随聚团孔隙率和硼颗粒粒径的变化
Fig. 8 Ignition temperature vs agglomeration porosity for various boron particle radii

图9给出了初温800 K的硼颗粒聚团在1400 K环境温度中着火延迟时间与聚团孔隙率和硼颗粒粒径之间的关系。由图可见,着火延迟时间随孔隙率增加而降低;同一孔隙率下,硼颗粒与颗粒聚团的粒径比增加时,着火延迟时间随之增大。分析认为,当外界环境达到着火条件时,降低孔隙率,则氧气向内扩散阻力加大,硼颗粒聚团的密度也随之增加,而增加硼颗粒与颗粒聚团的粒径比将会降低聚团内部单位体积氧化反应面积,这些均会造成硼颗粒聚团升温速率的降低,因此,着火延迟时间随之增加。

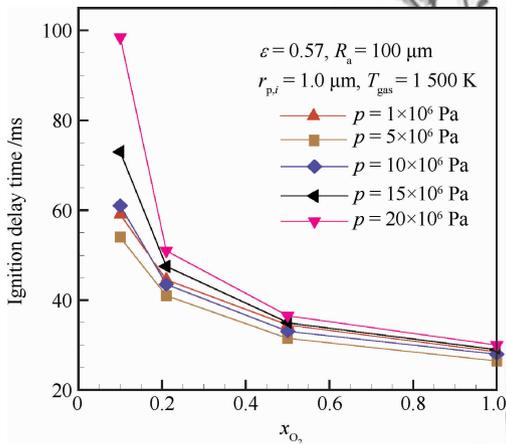


图7 着火延迟时间随氧气摩尔分数和环境总压的变化
Fig. 7 Ignition delay time vs oxygen mole fraction for various total ambient pressures

3.4 聚团孔隙率和硼颗粒粒径的影响

根据颗粒堆积理论^[15],单级球形颗粒实际可能的最小孔隙率不低于30%,据此,图8给出了初温800 K、半径100 μm的硼颗粒聚团在一定环境下着火温度与实际可能的聚团孔隙率和硼颗粒粒径之间的关系。由图可见,着火温度随孔隙率的增加而加大,且孔隙率越大,着火温度增加速率越快;同一孔隙率下,单颗粒硼与硼颗粒聚团的粒径比增加时,着火温度随之加大。分析认为,仅增大硼颗粒与颗粒聚团的粒径比或增大孔隙率都将

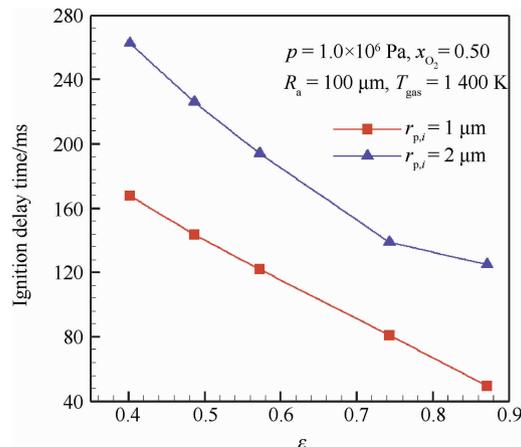


图9 着火延迟时间随聚团孔隙率和硼颗粒粒径的变化
Fig. 9 Ignition delay time vs agglomeration porosity for various boron particle radii

4 结 论

针对固体火箭冲压发动机内硼颗粒聚团的着火过程展开了研究,建立了考虑内部气相扩散和外部传热传质影响的硼颗粒聚团着火过程物理数学模型,分析了各因素的作用机制,并结合试验结果对模型进行了算例验证,得到如下结论:

1) 实现着火时,硼颗粒聚团在氧化反应自加热作用下升温加速,聚团表面附近氧气摩尔浓度梯度逐渐加大,而未能实现着火时,硼颗粒聚团最终进入一个缓慢氧化过程。

2) 硼颗粒聚团半径和环境中的氧气摩尔分数越大,环境总压、聚团孔隙率以及硼颗粒粒径越小,着火温度越低。环境温度越高,氧气摩尔分数、颗粒聚团孔隙率越大,着火延迟时间越小;硼颗粒粒径越大,着火延迟时间越大。

参 考 文 献

- [1] Gao D L, Zhang W, Zhu H, et al. Effect of oxidizer and agglomerated boron particle size on burning rate of fuel rich propellants. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2008, 31(4): 374-376. (in Chinese)
高东磊, 张炜, 朱慧, 等. 氧化剂和团聚硼粒度对富燃料推进剂燃速特性的影响. *固体火箭技术*, 2008, 31(4): 374-376.
- [2] Kuo K K, Pein R. *Combustion of boron-based solid propellants and solid fuels*. Boca Raton: Begell House Publishing Co. and CRC Press Inc., 1993: 1-81.
- [3] Shen H J. *Exploration and research on the key technologies of powdered fuel ramjet*. Changsha: College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
申慧君. 粉末燃料冲压发动机关键技术探索与研究. 长沙: 国防科学技术大学航天与材料工程学院, 2005.
- [4] Kazaoka Y, Takahashi K, Tanabe M, et al. Combustion characteristics of boron particles in the secondary combustor of ducted rockets. *AIAA-2011-5867*, 2011.
- [5] Zhang W B. *Study on mechanism of collision and agglomeration of fluidized particles*. Beijing: Graduate School of Tsinghua University, 2002. (in Chinese)
张文斌. 流化态颗粒的碰撞规律及团聚机理的研究. 北京: 清华大学热能工程研究所, 2002.
- [6] Karadimitris A, Scott II C, Netzer D, et al. Regression and combustion characteristics of boron containing fuels

for solid fuel ramjets. *Journal of Propulsion*, 1991, 7(3): 341-347.

- [7] Gurevich M A, Kir'yanov I M, Ozerov E S, et al. Combustion of individual boron particles. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1969, 5(2): 217-222.
- [8] Shevchuk V G, Zolotko A N, Polishchuk D I. Ignition of packed boron particles. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1975, 11(2): 218-223.
- [9] Bondarev V N, Zolotko A N, Klyachko L A, et al. Ignition of conglomerates. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1977, 13(2): 164-168.
- [10] King M K. Boron particles ignition in hot gas streams. *Combustion Science and Technology*, 1974, 8(5-6): 255-273.
- [11] Lin R T. *An introduction to heat transfer and mass transfer in porous media*. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese)
林瑞泰. 多孔介质传热传质引论. 北京: 科学出版社, 1995.
- [12] Ge Q R. *Kinetics of gas-solid reactions*. Beijing: Atomic Energy Press, 1991: 100-107. (in Chinese)
葛庆仁. 气固反应动力学. 北京: 原子能出版社, 1991: 100-107.
- [13] Li S C. *Experimental and theoretical studies of ignition and combustion of boron particles in wet and dry atmospheres*. Princeton: Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Princeton University, 1990.
- [14] Zolotko A N, Polishchuk D I, Shvets A I. Critical ignition condition for a suspension of conglomerates and boron particles. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1980, 16(1): 10-14.
- [15] Wu C B, Hu X F, Duan B T. Theoretical calculation for packing density of powder. *China Power Science and Technology*, 2009, 15(5): 76-81. (in Chinese)
吴成宝, 胡小芳, 段百涛. 粉体堆积密度的理论计算. *中国粉体技术*, 2009, 15(5): 76-81.

作者简介:

方传波 男, 博士研究生。主要研究方向: 固体火箭冲压发动机技术。
E-mail: fangchuanbo@163.com

夏智勋 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 固体火箭冲压发动机技术、水冲压发动机技术和高超声速飞行器总体技术。
Tel: 0731-84576450
E-mail: xiazhixun@sina.com

Study of Ignition Process of Boron Particle Agglomeration

FANG Chuanbo¹, XIA Zhixun^{1,*}, HU Jianxin², WANG Dequan¹, YOU Jin¹

1. *Science and Technology on Scramjet Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*

2. *College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*

Abstract: The ignition process of boron particle agglomerations in boron containing propellant ducted rockets is studied systematically. A one-dimensional model is proposed taking into consideration the gas phase diffusion process in the boron particle agglomeration, and the heat transfer and the mass transfer process between the boron particle agglomeration and the surroundings. The influence of total ambient pressure, gas temperature, oxygen mole fraction, agglomeration radius, agglomeration porosity, boron particle radius on ignition temperature as well as the influence of these factors on ignition delay time are analyzed in detail. The results show that the ignition temperature of boron particle agglomerations is much lower than that for single boron particle. And the ignition temperature decreases with the increase of the agglomeration radius and the oxygen mole fraction, but increases with the increase in the total ambient pressure, the agglomeration porosity and the boron particle radius. The ignition delay time of boron particle agglomerations decreases with the increase in the ambient temperature, the oxygen mole fraction and the agglomeration porosity, while it increases with the increase in the boron particle radius. Under high total ambient pressures, the ignition delay time increases with an increase in the total ambient pressure.

Key words: ducted rocket; boron particle; ignition model; ignition temperature; ignition delay time

Received: 2011-12-20; **Revised:** 2012-02-10; **Accepted:** 2012-03-13; **Published online:** 2012-03-22 16:44

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20120322.1644.006.html

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (51276194)

* **Corresponding author.** Tel.: 0731-84576450 E-mail: xiazixun@sina.com