

文章编号: 1006-9941(2004)06-0342-04

固体火箭冲压发动机 补燃室内硼颗粒点火计算研究

胡建新, 夏智勋, 罗振兵, 缪万波, 郭健, 赵建民
(国防科学技术大学航天与材料工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 采用 King 硼颗粒点火模型, 研究固体火箭冲压发动机补燃室内温度、压强、氧气摩尔浓度、硼颗粒初始半径对硼颗粒点火的影响。计算结果表明: 当颗粒初始条件确定后, 存在一个颗粒点火所需的最低环境温度; 当氧气摩尔分数比较低时, 增加环境总压, 颗粒点火时间增加; 当氧气摩尔分数比较高时, 增加环境总压, 颗粒点火时间反而减少; 增大颗粒半径后, 颗粒点火时间也增加; 当环境温度升高时, 颗粒点火时间显著减少。

关键词: 物理化学; 富燃推进剂; 固体火箭冲压发动机; 硼颗粒; 点火; 燃烧
中图分类号: TJ760.3; V512 **文献标识码:** A

1 引言

为适应新一代导弹技术的要求, 固体火箭冲压发动机用贫氧固体推进剂将向高能化方向发展^[1]。同其它金属填料相比, 硼以其较高的质量热值和容积热值被认为是贫氧固体推进剂的最佳燃料^[2]。含硼贫氧固体推进剂在燃气发生器中由于缺氧和低温而不可能充分点火燃烧, 因此含有大量硼颗粒的富燃燃气在补燃室中是与空气掺混完成燃烧的。然而, 由于硼颗粒的点火和燃烧过程比较复杂, 要获得硼所含的能量非常困难。

早在 60 年代, 美国等西方国家就开始了硼颗粒的点火、燃烧研究, 并于 70 年代初期提出了著名的 King 点火模型^[3,4]。80 年代后期, 研究者对硼颗粒的点火、燃烧又有了新的认识, 以 Williams 和 Kuo K K 为代表提出了新的硼颗粒点火、燃烧模型^[5,6]。本文采用 King 硼颗粒点火模型, 研究在固体火箭冲压发动机补燃室内温度、压强、氧气摩尔浓度、硼颗粒初始半径对硼颗粒点火的影响。

2 硼颗粒点火模型

从固体火箭冲压发动机燃气发生器进入补燃室的

收稿日期: 2004-06-08; 修回日期: 2004-08-02

作者简介: 胡建新(1975-), 男, 博士研究生, 从事火箭发动机过流仿真和火箭冲压发动机的研究。e-mail: uoyevolun@hotmail.com

硼颗粒结构以及其点火原理如图 1 所示。硼颗粒的燃烧过程由两连续的阶段构成: 第一阶段是硼颗粒的加热以及它在液态氧化物层的包覆下与氧化性气体反应, 随着氧化层的蒸发和反应生成挥发性产物, 氧化层越来越薄, 当它完全挥发(厚度为零)时, 第一阶段结束, 这一阶段是硼点火过程; 第二阶段是洁净的硼颗粒(无液态氧化层)和周围氧化性气体之间的直接反应, 生成最终燃烧产物或过度性燃烧产物(它进一步氧化生成最终产物), 这一阶段是硼燃烧过程, 绝大部分硼是在这一阶段消耗。建立硼颗粒的点火模型就是以硼的点火机理为基础, 确定硼颗粒尺寸、氧化层厚度以及硼颗粒温度与点火时间之间的关系。在建模过程中, 认为硼颗粒是不含杂质的球体。

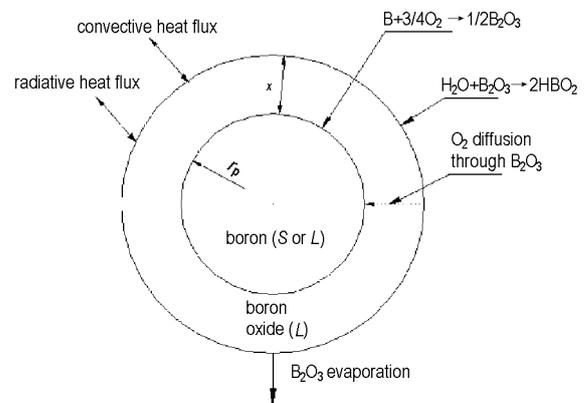


图 1 带有液态氧化层的硼颗粒点火原理示意图
Fig. 1 Ignition scheme of boron particles covered with a thin boron-oxide layer

由硼颗粒点火机理可知,其点火时间是由氧化层产生和消耗的速率来决定,当氧化层的消耗速率大于产生速率时,硼颗粒才能点火,消耗速率越大点火时间

越短;当氧化层的产生速率大于消耗速率时,氧化层的厚度增加,硼颗粒不能点火。由硼颗粒质量方程、三氧化二硼质量方程以及能量方程可得:

$$\frac{dr_p}{dt} = -\frac{R_B M_B}{4\pi r_p^2 \rho_B} \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{(R_B/2 - R_E - R_H) M_{B_2O_3}}{4\pi r_p^2 \rho_{B_2O_3}} \quad (2)$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{Q_1}{4\pi r_p^3 \rho_B c_{pBs}/3 + 4\pi r_p^2 x \rho_{B_2O_3} c_{pB_2O_3}} \quad (T_p < 2450 \text{ K}, f = 0) \quad (3a)$$

$$\frac{df}{dt} = \frac{Q_1}{4\pi r_p^3 \rho_B \Delta H_M/3} \quad (T_p < 2450 \text{ K}, 0 < f < 1) \quad (3b)$$

$$Q_1 = R_B Q_{RX} - R_E \Delta H_{vap} - R_H \Delta H_H + 4\pi(r_p + x)^2 [h(T_0 - T_p) + \sigma \epsilon \alpha_R (T_{RAD}^4 - T_p^4)]$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{Q_2}{4\pi r_p^3 \rho_B c_{pB1}/3 + 4\pi r_p^2 x \rho_{B_2O_3} c_{pB_2O_3}} \quad (T_p > 2450 \text{ K}, f = 1) \quad (3c)$$

$$Q_2 = R_B Q_{RX_2} - R_E \Delta H_{vap} - R_H \Delta H_H + 4\pi(r_p + x)^2 [h(T_0 - T_p) + \sigma \epsilon \alpha_R (T_{RAD}^4 - T_p^4)]$$

式中, r_p 、 x 、 f 、 T_0 、 T_p 、 T_{RAD} 分别是硼颗粒半径、氧化层厚度、液态硼质量分数、环境温度、颗粒温度和周围辐射温度, R_B 、 R_E 、 R_H 分别是硼消耗速率、三氧化二硼蒸发速率和三氧化二硼与水反应速率, 式中其它变量的含义和取值参见文献[4]。式(3a)是当颗粒温度低于硼熔点(2450 K)时,颗粒温度随时间变化。式(3b)是当颗粒温度等于硼熔点时,颗粒温度不变,液态硼质量分数随时间变化。式(3c)是当颗粒温度高于硼熔点时,液态硼质量分数不变,颗粒温度随时间变化。

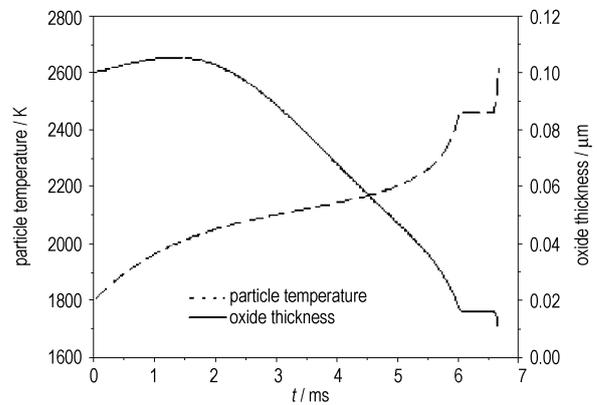


图 2 点火过程中颗粒变量随时间的变化曲线 ($T_0 = 2100 \text{ K}$)

Fig. 2 Predicted time dependence of variables for particle when igniting ($T_0 = 2100 \text{ K}$)

3 计算结果及讨论

3.1 环境温度对硼颗粒点火的影响

初始半径为 $10 \mu\text{m}$, 液态氧化层厚度为 $0.1 \mu\text{m}$, 初始温度为 1800 K 的硼颗粒在环境温度和周围辐射温度都为 2100 K , 总压为 0.5 MPa , 氧气摩尔分数为 0.2 的条件下点火, 颗粒温度和氧化层厚度随时间变化曲线如图 2 所示。由于周围气体对颗粒的对流传热和辐射传热, 颗粒温度一直上升, 直到达到硼颗粒的熔点, 当硼颗粒完全熔化后颗粒温度又开始上升。当颗粒温度不高时, 氧化层的产生速率大于消耗速率, 氧化层的厚度增加; 当颗粒温度高于 2000 K 后, 氧化层的消耗速率大于产生速率, 氧化层的厚度开始减少, 直到厚度减少为 0 , 则硼颗粒的点火完成进入燃烧阶段。

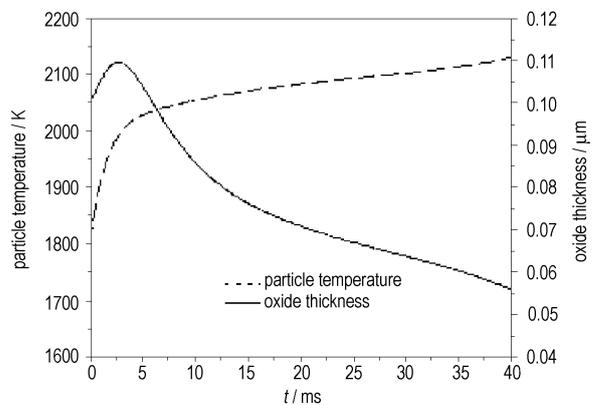


图 3 点火过程中颗粒变量随时间的变化曲线 ($T_0 = 2000 \text{ K}$)

Fig. 3 Predicted time dependence of variables for particle when igniting ($T_0 = 2000 \text{ K}$)

当环境温度和周围辐射温度都为 2000 K 时, 颗粒温度和氧化厚度随时间变化曲线如图 3 所示。当颗粒温度上升到 2000 K 后, 由于氧化层的产生速率与消耗速率相当, 颗粒的温度和氧化层的厚度基本不变, 硼

颗粒没有被点燃。当环境温度和周围辐射温度都为 1900 K 时,氧化层的产生速率大于消耗速率,氧化层的厚度增加(如图 4 所示),硼颗粒没有被点燃。因此,环境温度对硼颗粒的点火有很大的影响。当颗粒初始条件确定后,环境温度存在一个极值,只有当环境温度高于这个极值时颗粒才能被点燃。

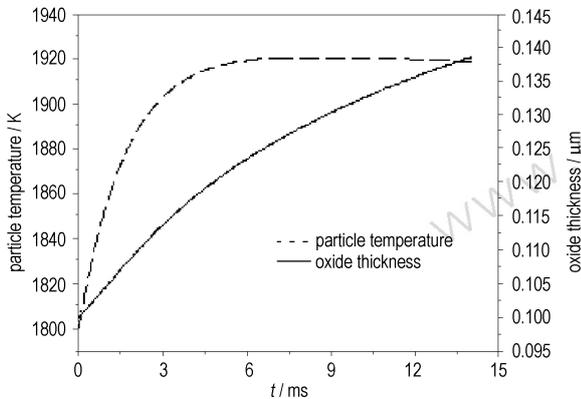


图 4 点火过程中颗粒变量随时间的变化曲线($T_0 = 1900\text{ K}$)

Fig. 4 Predicted time dependence of variables for particle when igniting($T_0 = 1900\text{ K}$)

3.2 环境压强对硼颗粒点火的影响

初始半径为 $2\ \mu\text{m}$, 液态氧化层厚度为 $0.02\ \mu\text{m}$, 初始温度为 1800 K 的硼颗粒, 环境温度和周围辐射温度都为 2100 K 时, 在不同氧气摩尔分数的条件下, 环境总压对颗粒点火时间的影响如图 5 所示。当氧气摩尔分数比较低时, 增加环境总压, 颗粒点火时间增加。当氧气摩尔分数比较高时, 增加环境总压, 颗粒点火时间反而减少。这主要是氧气分压对三氧化二硼生成的影响和环境总压对三氧化二硼蒸发的影响相互作用引起的。

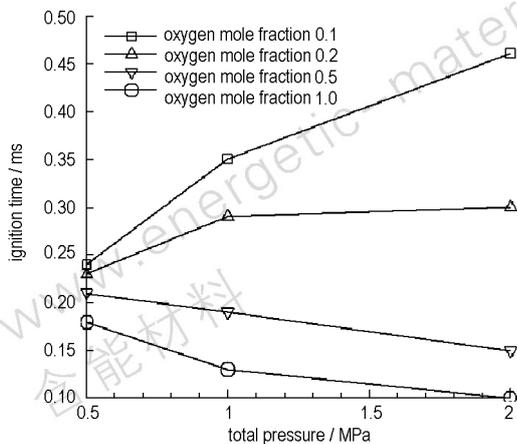


图 5 环境压强对点火时间的影响

Fig. 5 Effect of total pressure on ignition time

3.3 颗粒半径对硼颗粒点火的影响

液态氧化层厚度为 $0.02\ \mu\text{m}$, 初始温度为 1800 K 的硼颗粒, 总压为 0.2 MPa, 氧气摩尔分数为 0.5 时, 在不同环境温度的条件下, 颗粒初始半径对颗粒点火时间的影响如图 6 所示。增大颗粒半径后, 颗粒点火时间也增加。并且从图中可以发现, 当环境温度升高时, 颗粒点火时间显著减少。

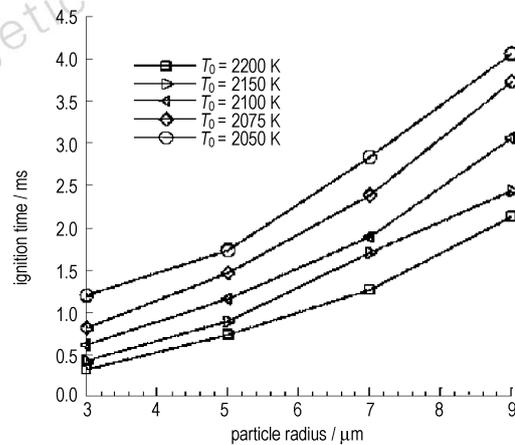


图 6 颗粒半径对点火时间的影响

Fig. 6 Effects of total pressure on ignition time

4 结论

计算结果表明, 当颗粒初始条件确定后, 存在一个颗粒点火所需的最低环境温度; 当氧气摩尔分数比较低时, 增加环境总压, 颗粒点火时间增加; 当氧气摩尔分数比较高时, 增加环境总压, 颗粒点火时间反而减少; 增大颗粒半径后, 颗粒点火时间也增加; 当环境温度升高时, 颗粒点火时间显著减少。目前, 国内外研制的固体火箭冲压发动机补燃室内流动马赫数一般为 0.3 ~ 0.4。补燃室的长度一般为 0.8 ~ 1.4 m。可见, 颗粒在补燃室内的停留时间只有几个毫米, 而补燃室内温度、压强、氧气摩尔浓度、硼颗粒初始半径对硼颗粒点火燃烧都有很大影响, 因而, 在这么短的时间里必须较好地组织二次燃烧才能达到较高的燃烧效率。

参考文献:

- [1] 王宁飞, 关大林, 范红杰. 硼颗粒点火和燃烧研究进展 [J]. 含能材料, 2001, 9(2): 86 - 89.
WANG Ning-fei, GUAN Da-lin, FAN Hong-jie. Development of boron particles ignition and combustion [J]. *Hanneng Cailiao*, 2001, 9(2): 86 - 89.
- [2] 毛成立, 李葆萱, 胡松启, 等. 热空气中硼粒子点火模

