

文章编号: 1006-9941(2007)04-0431-05

## 氧化性气氛中硼颗粒点火模型研究综述

高东磊, 张 炜, 姬壮周

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 介绍了硼颗粒在氧化性气氛中的点火特性。依据硼颗粒的点火机理及相应的化学反应, 从不同的思路阐述了两种模型的处理过程和方法, 着重分析了硼颗粒氧化层的产生和消耗及其影响因素, 建立了两种模型的数学处理方法, 并对此两类模型进行了分析比较。

**关键词:** 物理化学; 硼颗粒; 点火; 模型; 化学机理

**中图分类号:** V512; TJ7

**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富燃料推进剂正向高能化方向发展。硼以其高的质量热值和体积热值被认为是固体富燃料推进剂的首选燃料。计算表明<sup>[1]</sup>, AP/HTPB 基含硼富燃料推进剂的理论比冲可达  $10000\text{N} \cdot \text{S}/\text{kg}$  以上, 是铝镁富燃料推进剂的 1.6~1.8 倍, 是高能固体火箭推进剂的 3~5 倍。

尽管硼作为固体火箭冲压发动机的燃料具有优越的能量性能, 但在实际应用中存在点火性能差、燃烧效率低等问题, 影响了其能量性能的发挥。明确硼颗粒的点火与燃烧机理, 是改善硼颗粒点火与燃烧的前提, 也是研究含硼富燃料推进剂燃烧机理的基础。国内外学者对不同环境气氛中硼颗粒的点火和燃烧行为作了大量的研究<sup>[2-6]</sup>, 并以硼颗粒的点火与燃烧机理研究为基础, 提出了改善硼颗粒点火及提高硼颗粒燃烧效率的方法<sup>[7-11]</sup>, 本文就氧化性气氛中硼颗粒的点火机理及模型作一综述。

### 2 硼颗粒的点火特性

硼颗粒的自点火研究所采用的燃烧器包括激波管 (Uda<sup>[12]</sup>、Krier<sup>[13]</sup> 等), 平面火焰器 (Macek<sup>[14]</sup>、Williams<sup>[3]</sup>、Kuo<sup>[4]</sup> 等), 高压反应器 (Robert<sup>[15]</sup>)。环境条件从 O/N 体系开始, 发展到 C/H/O/N 体系。由于 F 有利于硼颗粒的点火与燃烧, 人们又开展了 C/H/O/F/N 体系的研究。

在 C/H/O/N 体系中, 硼颗粒的点火与燃烧过程分为两个阶段<sup>[14]</sup>, 当硼颗粒被加热到 1800~2000 K 时, 开

始发光, 并持续一段时间, 然后几乎熄灭。如果环境温度足够高, 硼颗粒重新点着, 相比于第一阶段, 燃烧更猛烈, 持续时间更长。一般认为, 第一阶段是硼颗粒的加热以及在液态氧化层包覆下同氧化性气体的化学反应, 氧化层的蒸发及反应生成的挥发性产物不断消耗氧化层, 同时硼的氧化反应也不断形成新的氧化层。当温度足够高时, 氧化层的消耗速度大于生成速度, 最终氧化层完全去除, 通常称这一阶段为点火阶段; 第二阶段为洁净硼和周围氧化性气体的直接反应, 反应更为猛烈一些, 绝大部分硼的消耗及热量的释放发生在这一阶段, 反应生成最终燃烧产物或过渡性燃烧产物 (进一步氧化成最终产物), 通常称这一阶段为燃烧阶段。

相对于 C/H/O/N 体系, 在 C/H/O/F/N 体系中, 硼颗粒的燃烧更为剧烈, 持续时间更短, 无法明确的区分点火与燃烧阶段<sup>[16,17]</sup>。

硼颗粒的点火是一个复杂的过程, 首先, 硼颗粒在周围环境的对流和辐射热作用下缓慢加热, 硼颗粒温度较低时, 化学反应放热可忽略不计, 当温度达到 1500~1800 K 时, 反应速率加快, 反应放热促进了硼颗粒的自加热作用。由于硼颗粒的表面包覆了一层致密的硼氧化物, 硼和氧化性气体必须通过相互扩散才能发生反应。随着反应的进行, 氧化层不断加厚, 增大了扩散阻力。与此同时, 硼颗粒温度的升高促进了氧化层的蒸发, 氧化层同水蒸气、氟及氟化物反应生成挥发性气体促进了氧化层的消耗, 且高温降低了氧化膜的粘度, 从而减小了扩散阻力。氧化层的生成与消耗存在竞争的关系, 当氧化层的厚度为零时, 点火阶段完成, 硼颗粒进入全羽状的燃烧阶段。

人们通过硼颗粒点火和燃烧的试验研究, 考察不同环境条件下硼颗粒的粒径、氧化层厚度及颗粒温度随点火时间的变化关系, 建立并完善硼颗粒的点火模型。依

收稿日期: 2006-10-19; 修回日期: 2007-01-24

基金项目: “十一五”国防预研

作者简介: 高东磊(1980-), 男, 博士研究生, 研究领域为固体推进剂。

e-mail: gaodong\_ren@163.com

据点火模型,分析不同气氛组成对硼颗粒的点火延迟时间和最低点火温度的影响,从而为改善硼颗粒的点火(降低点火温度,缩短点火时间)的方法和途径提供理论指导。硼颗粒的点火模型主要分为两类,一类是以 King<sup>[2]</sup>、Williams<sup>[3]</sup>和 Kuo<sup>[4]</sup>等为代表的半经验模型,另一类是 Princeton/Aerodyne 研究小组的化学机理模型。

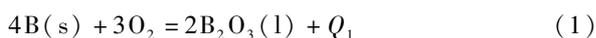
### 3 硼颗粒点火的半经验模型

硼颗粒点火的半经验模型最早是由 King 提出的,此后再大量实验的基础上 King 又完善和发展了该模型,借助现代仪器分析手段,Williams 和 Kuo 等对其进行了修正、完善和补充。半经验模型对化学反应及扩散过程的控制步骤作了预先的设定,并简化了复杂的化学反应,应用合理的化学和机理参数,能比较精确的得到硼颗粒点火过程中的一些重要参数,如硼颗粒温度、氧化层厚度、点火时间等,有助于判定各因素对硼颗粒点火过程的影响,对改善硼颗粒点火的途径和方法具有重要指导意义。

#### 3.1 机理分析

硼颗粒点火过程就是其表面氧化层的生成速率与消耗速率相互竞争的过程。当氧化层的消耗速率大于生成速率,硼颗粒才能点火;反之,氧化层的厚度增加,硼颗粒不能点火。

不同温度下,氧化层的生成反应存在差异。在低温下(小于 1650 K),环境中的氧通过液态氧化层扩散到硼与氧化层的界面上,在界面上与硼发生化学反应,生成三氧化二硼,使氧化层厚度增加。其反应式为:



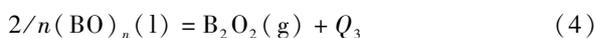
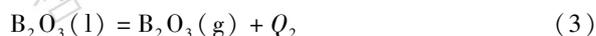
当温度足够高时,硼溶于液态的三氧化二硼并与之发生反应,形成聚合物 $(\text{BO})_n$ 。其化学反应为



该聚合物通过液态氧化层向外扩散,并在氧化层-气相界面上通过蒸发与化学反应的方式消耗掉。此时,液态氧化层为三氧化二硼与聚合物 $(\text{BO})_n$ 的混合物, $(\text{BO})_n$ 的生成速率即为氧化层的增加速率。

硼颗粒要实现自发自燃,氧化层的消耗速率必须大于生成速率。氧化性气氛中,氧化层的消耗主要由以下几个独立过程组成:液态 $\text{B}_2\text{O}_3$ 的蒸发;液态 $(\text{BO})_n$ 的蒸发; $(\text{BO})_n$ 与氧、水蒸气、氟化氢及氟的化学反应。

氧化层的蒸发及分解反应为:

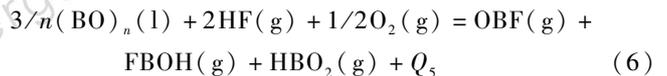


$\text{B}_2\text{O}_3(\text{l})$ 及 $(\text{BO})_n(\text{l})$ 的蒸发速率可分别用 $R_E$ 及 $R_{\text{B}_2\text{O}_2}$ 表示,具体见参考文献[2,3]。

氧化层的蒸发是十分缓慢的过程,氧化层的消耗主要通过化学反应实现。高温下反应生成的 $(\text{BO})_n$ 向外扩散,在气-液界面上与氧发生反应,反应速率为 $R_{\text{BO}_2}$ <sup>[3]</sup>。



Ulas 等<sup>[16]</sup>对硼颗粒在含氟环境中的点火和燃烧行为进行了研究,并参考前人的研究结论,认为 HF 及 F 通过以下反应消耗氧化层,相应的反应速率为 $R_{\text{HF}}$ 、 $R_F$ 。



另外,水蒸汽通过与液态氧化层反应生成易挥发性的物质促进了液态氧化层的消耗<sup>[6]</sup>。其反应式为式(8),反应速率为 $R_H$ 。



依据点火机理,氧化层的消耗速率越大,硼颗粒的点火时间越短。分析可得出如下结论:(1)环境温度越高,氧化层的消耗速率越大;(2)水蒸气的存在加速氧化层的消耗;(3)氟及氟化物的存在加速氧化层的消耗。

#### 3.2 控制方程

在硼颗粒的点火过程中,分别采用硼颗粒的质量守恒和氧化层的质量守恒方程,可动态分析出硼颗粒及氧化层的消耗随时间的变化过程。点火过程中,硼颗粒的半径因硼的消耗而不断减小。氧化性气氛中,依据 Kuo 的观点,硼颗粒半径的减小是因为硼不断溶解在氧化层中,其微分方程为:

$$\frac{dr_p}{dt} = - \left( \frac{2}{3}R_{\text{B}_2\text{O}_2} + R_{\text{BO}_2} + \frac{2}{3}R_H + R_F + R_{\text{HF}} \right) \frac{M_B}{\rho_B} \quad (9)$$

氧化层厚度的微分方程为:

$$\frac{dx}{dt} = - \left( \frac{2}{3}R_{\text{B}_2\text{O}_2} + R_E + \frac{2}{3}R_H + R_F + R_{\text{HF}} \right) \frac{M_{\text{B}_2\text{O}_3}}{\rho_{\text{B}_2\text{O}_3}} \quad (10)$$

依据能量守恒方程,可动态的分析硼颗粒的温度随时间的变化关系,由于硼颗粒在点火过程中可能存在相变过程,因此其温度的微分方程可表示如下。

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{Q}{(1-f)\frac{4}{3}\pi r_p^3 \rho_B C_{\text{PB}(\text{s})} + f\frac{4}{3}\pi r_p^3 \rho_B C_{\text{PB}(\text{l})} + 4\pi r_p^2 \rho_{\text{B}_2\text{O}_3} C_{\text{P}(\text{B}_2\text{O}_3)}} \quad (11)$$

$$Q = -4\pi r_p^2 (R_{\text{B}_2\text{O}_2} Q_3 + R_E Q_2 + R_{\text{BO}_2} Q_4 + R_{\text{HF}} Q_5 + R_F Q_6 + R_H Q_7) + h(T_\infty - T_p) + \sigma \varepsilon B (T_{\text{sur}}^4 - T_p^4)$$

式中, $Q$ 表示硼颗粒点火过程中的热量变化,其值由化学反应热及环境热交换决定, $\rho$ 及其下标的组合表示各物质的密度, $C_p$ 及其下标的组合表示各物质的比

热,  $T_{\text{melt}}$  为硼的熔点,  $Q_{\text{melt}}$  为硼的熔化热,  $f$  为液态硼的比例,  $h(T_g - T_p)$ ,  $\sigma \varepsilon B(T_{\text{sur}}^4 - T_p^4)$  分别表示硼颗粒与环境的对流换热与辐射换热。

给定初始条件,应用控制方程即可计算出硼颗粒点火过程中的各种参数,并得出硼颗粒的点火延迟时间。

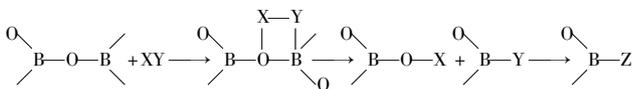
## 4 化学机理模型

Princeton/Aerodyne 研究小组<sup>[15-19]</sup>从反应机理及分子扩散的角度考察了硼颗粒的点火与燃烧,详细研究了硼颗粒点火过程中的物理和化学变化,分析了硼氧化物-气相界面上的多相反应、液态氧化层中的分子扩散及硼-硼氧化物界面上多相反应,提出了多相点火模型。

### 4.1 机理分析

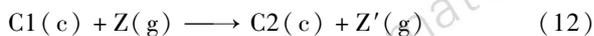
#### 4.1.1 氧化层-气相界面上的多相反应

根据热力学分析,硼氧化物同环境气体之间存在很多可能的反应,若反应生成焓大于三氧化二硼的蒸发吸收焓,硼氧化物的蒸发占主导地位,因此仅考虑生成焓小于 418 kJ/mol 的反应。界面上的多相反应由化学吸附和化学解吸两个阶段组成。化学吸附阶段,气相物质 XY 通过化学键的方式吸附于氧化层的表面,电负性组分 Y 吸附于硼,电正性组分 X 吸附于氧。进一步化学键重新组合,形成新的产物:



如果 X 是 B,则 B 原子插入到 B—O 键,形成 B=O 双键。一般情况下,Z 为 Y、OX 或 BO。此类反应为一阶吸附反应,吸附反应及其速率常数见文献[20]。

在进一步的研究中,研究者考察了环境气氛同吸附产物之间的二阶吸附反应<sup>[20]</sup>,完善了硼颗粒的点火模型,这类反应的一般形式为:



式中,C1(c)和 C2(c)表示表面络合物,由液态氧化层  $\text{B}_2\text{O}_3(l)$  同界面上的气体产物通过化学键形成的,如:

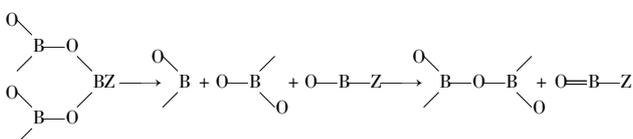


Z(g)和 Z'(g)表示气体产物,如:



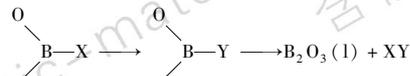
反应速率的求法具体参考文献[21]。

解吸阶段,两个 B—O 键断裂,同时形成 B=O 双键,反应顺序如下:



O=B—Z 为气相产物(如:OBH、OBF、OBOB 等)。此为一阶解吸反应,解吸反应及反应速率常数见文献<sup>[20]</sup>。

由于总反应为可逆反应,吸附反应同样为可逆反应,因此存在二阶解吸反应,其反应历程可近似表示为:



二阶解吸反应及其速率常数见文献<sup>[20]</sup>。

#### 4.1.2 液态氧化层-气相界面上的物理吸附

在硼氧化物-气相界面发生化学吸附的同时,部分气相物质穿透液态氧化层溶于其中,通常称之为物理吸附。因溶解度和浓度的不同,不同气相物质的吸附速率(物理吸附)存在差异。

为简化吸附模型,认为部分气相物质的物理吸附速率为零,主要从以下几点考虑:1)物理吸附速率远小于化学吸附速率;2)溶解度非常小;3)自身含量极少。

基于以上分析,点火模型仅考虑  $\text{O}_2(g)$ 、 $\text{CO}(g)$ 、 $\text{CO}_2(g)$ 、 $\text{BO}(g)$ 、 $\text{BO}_2(g)$ 、 $\text{B}_2\text{O}_2(g)$  的物理吸附,吸附速率同相应气体的分压及扩散系数相关,具体表达式见文献[21]。

#### 4.1.3 氧化层-硼界面上的多相反应

部分气相物质穿透液态氧化层后,同洁净硼发生反应。基于以上分析,只有溶解于液态氧化层中的  $\text{O}_2(d)$ 、 $\text{CO}(d)$ 、 $\text{CO}_2(d)$ 、 $\text{BO}(d)$ 、 $\text{BO}_2(d)$ 、 $\text{B}_2\text{O}_2(d)$  (d 表示溶解在液态氧化层中的气体)在硼-硼氧化物界面上同洁净硼发生反应,具体反应及其速率常数见文献[21]。

### 4.2 控制方程

硼颗粒点火过程中,液相氧化层的质量守恒和能量守恒方程可表示为:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho_1 v_1) = 0 \quad (15)$$

$$\rho_1 \frac{\partial Y_{1,i}}{\partial t} + \rho_1 v_1 \frac{\partial Y_{1,i}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho_1 Y_{1,i} V_{1,i}) - \omega_{1,i} W_i = 0 \quad (16)$$

$$\rho_1 C_{p,1} \frac{\partial T_1}{\partial t} + \rho_1 C_{p,1} v_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r}) + \sum_{i=1}^{N_i} (\omega_{1,i} H_{1,i}) = 0 \quad (17)$$

$$\rho_1 = f(p, T_1) \quad (18)$$

式中, $r$  表示对称球坐标系, $t$  表示时间, $\rho_1$  表示液相的质量密度, $v_1$  表示液相的径向速度, $Y_{1,i}$  表示第  $i$  种液相组分的质量分数, $V_{1,i}$  表示第  $i$  种液相组分的扩散速率, $\omega_{1,i}$  表示第  $i$  种组分单位体积内的化学反应速率, $W_i$  表示第  $i$  种组分的分子量, $C_{p,1}$  表示液相组分的定压比热, $T_1$  表示液相温度, $\lambda_1$  表示液相组分的热导率, $H_{1,i}$  表示第  $i$  种组分的反应生成焓, $N_i$  表示液相组分的种类。

依据对硼颗粒点火过程中分子扩散及不同界面上

多相反应的分析,确定不同物质在液态氧化层中的溶解度和扩散系数及不同基元反应的活化能和指前因子,并结合(15)~(18)式,即可对硼颗粒的点火过程进行数学模拟和分析。

## 5 分析对比

半经验模型设定了化学反应及扩散过程控制步骤,并简化了复杂化学反应,计算过程较为简单,可较好的分析环境温度、压强及气氛组成对硼颗粒点火延迟时间的影响。但由于自身的限制,半经验模型不能分析出点火过程中各反应物、中间产物及最终产物浓度的变化。胡建新等<sup>[22]</sup>应用半经验模型分析了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,结果表明,氧气摩尔分数较高时,增加环境总压,颗粒点火时间减少,减小硼颗粒粒径和提高环境温度亦有助于减少点火时间。

化学机理模型从分子扩散及基元反应的层次分析氧化性气氛中硼颗粒的点火过程,弥补了半经验模型的缺陷,不仅可模拟硼颗粒的点火延迟时间,亦可分析出点火过程中各产物的变化,相对而言,计算过程较为复杂。依据化学机理模型,可明确硼颗粒点火过程中的速率控制步骤及关键反应,进而对其进行更深层次的研究,亦可有针对性地调整推进剂配方,以改善硼颗粒的点火与燃烧。但在化学机理模型中,多数基元反应的速率常数及活化能只能采取预估的方式获得,缺乏实验数据支持。Zhou 等<sup>[21]</sup>采用化学机理模型研究了硼颗粒的点火,结果表明,硼颗粒的点火过程是氧化物的移走过程,氧化层的汽化速率受化学吸附和解吸反应控制,硼粒子的点火延迟时间同氧化层的厚度呈线性关系,同时,HF 的存在有利于减小点火延迟时间,且反应生成 OBF(g)和 BF<sub>3</sub>(g)有助于热量的释放。

对比胡建新和 Zhou 的计算结果,不难发现,利用半经验模型,可明确的分析各外部环境对硼颗粒点火延迟时间的影响,但不能分析出点火过程中中间产物的变化及对硼颗粒点火的影响。应用化学机理模型,可明确的分析出硼颗粒点火的控制步骤及反应的中间产物,并且可明确的分析出各反应物对硼颗粒点火的影响。

## 6 结束语

经过长期的研究,人们对氧化性气氛中硼颗粒的点火有了一定的认识,依据半经验模型及化学机理模型可知,水蒸气的存在有利于硼颗粒的点火,氟及其化合物易于同硼氧化物发生反应且生成气态产物,加速了氧化

层的消耗,从而降低了硼颗粒的点火温度及点火时间。

但针对不同的模型,仍需开展进一步的研究工作,针对半经验模型,不同温度阶段,硼和氧在液态氧化层中的扩散动力学模型的研究,不同反应的产物的明确及反应动力学参数的研究,是正确认识硼颗粒点火机理的关键;针对化学机理模型,不同基元反应的反应速率常数需要通过实验或计算的方式进一步确定,这样才能真正意义上从化学机理的角度分析氧化性气氛中硼颗粒的点火。

### 参考文献:

- [1] 王桂兰, 赵秀媛. 硼粉在推进剂中应用研究[J]. 固体火箭技术, 1998, 21(2): 46-50.  
WANG Gui-lan, ZHAO Xiu-yuan. Application study of boron powder in propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 1998, 21(2): 46-50.
- [2] King M K. Ignition and combustion of boron particles and clouds [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1982, 19(4): 294-306.
- [3] Li S C, Williams F A. Ignition and Combustion of Boron in Wet and Dry Atmospheres [A]. Twenty-third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1990, 1147-1154.
- [4] Yeh C L and Kuo K K. Ignition and Combustion of Boron Particles [J]. *Prog Energy Combust Sci*, 1996, 22: 511-541.
- [5] Dreizin. E. L., Keil. D. G. and Felder. W. Phase Change in Boron Ignition and Combustion [J]. *Combustion and Flame*, 1999, 272-290.
- [6] Martin J. Spalding, Herman Krier and R. L. Burton. Chemical Kinetics of Boron Combustion in High Pressure Ar/F/O<sub>2</sub> Mixtures [R]. AIAA-98-3823.
- [7] 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]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2001, 9(2): 86-89.
- [8] 王进, 李凤生, 宋洪昌等. 硼复合粒子的制备及其性能表征[J]. 含能材料, 2005, 13(5): 291-294.  
WANG Jin, LI Feng-sheng, SONG Hong-cheng, et al. Preparation & Characterization of Boron Composite Particles [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(5): 291-294.
- [9] 王英红, 李葆萱, 胡松起等. AP 粒度和包覆层对硼燃烧的影响[J]. 固体火箭技术, 2004, 27(1): 50-52.  
WANG Ying-hong, LI Bao-xuan, HU Song-qi, et al. Effect of AP Particle size and Coating on Combustion of Boron [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2004, 27(1): 50-52.
- [10] T. K Liu. Effect of fluorinated graphite on combustion of boron and boron-based fuel-rich propellants [J]. *Journal of propulsion and power*, 1996, 12(1): 26-33.
- [11] 郑剑, 李学军, 庞爱民等. 国内外含硼富燃料推进剂燃烧性能研究现状[J]. 飞航导弹. 2003, (4): 50-54.
- [12] Uda R T. A Shock-Tube Study of the Ignition Limit of Boron Particles [R]. G. A./M. E. Thesis, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson Air Force Base, Dayton, Ohio, 1968.

- [13] Krier H, Burton R L, Pirman S R, et al. Shock initiation of crystalline boron in oxygen and fluorine compounds [R]. *AIAA J.*, 1996, 12(4): 672-679.
- [14] Macek A, Semple J M. Combustion of boron particles at atmospheric pressure [J]. *Combustion Sci. and Technol.*, 1969(1): 181-191.
- [15] Robert O Foelsche, Rodney L Burton, et al. Boron particle ignition and combustion at 30-150 atm [J]. *Combustion and Flame*, 1999, 117: 32-58.
- [16] Abdullah Ulas and Kenneth K KUO. Ignition and Combustion of Boron Particles in Fluorine-Containing Environments [J]. *Combustion and Flame*, 2001, 127: 1935-1957.
- [17] Abdullah Ulas and Kenneth K KUO. Ignition and Combustion of Boron Particles in Fluorine-Containing Environments. Pennsylvania: Pennsylvania University, 2000.
- [18] Zhou W. Numerical Study of Multi-Phase Combustion; Ignition and Combustion of an Isolated Boron Particle in Fluorinated Environments. Candidacy: Princeton University, 1998.
- [19] Yetter R A, Dryer F L, et al. Effect of fluorine on the gasification rate of liquid boron oxide droplets [J]. *Combustion and Flame*, 1998, 112: 387-403.
- [20] Brown R C, Kolb C K. Kinetic modeling and sensitivity analysis for B/H/O/C/F combustion systems [J]. *Combustion and Flame*, 1995, 101: 221-238.
- [21] Zhou W, Yetter R A, Dryer F L, et al. Multi-phase model for ignition and combustion of boron particles [J]. *Combustion and Flames*, 1999, 17: 227-243.
- [22] 胡建新, 夏智勋, 罗振兵, 等. 固体火箭冲压发动机补燃室内硼颗粒点火计算研究 [J]. *含能材料*, 2004, 12(6): 342-345.
- HU Jian-xin, XIA Zhi-xun, LUO Zhen-bing, et al. Calculation Study on Ignition of Boron Particle of Ducted Rocket Secondary Chamber [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(6): 342-345.

## Review on Models of Boron Particles Ignition in Oxidative System

GAO Dong-lei, ZHANG Wei, JI Zhuang-zhou

(National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The characteristic of boron particle ignition in oxidative system was introduced. According to the analysis of Boron ignition mechanisms and corresponding chemical reactions, the disposals of two different models were explained from two different points, and emphasizes were placed on analysis of the generation and consumption of oxide on the surface of boron particles. Boron particle ignition mathematical models were established and compared finally.

**Key words:** boron particles; ignition; model; chemical kinetics

(上接 424 页)

- [21] Rozenbad VI, Afanaseval L F, Lebedva V A, et al. Activation of ignition of aluminum and its mixtures with oxides by chromium chloride [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1990, 26(5): 13-15.
- [22] Timothy F. Miller, Jeremy L. Walter, Daniel H. Kiely. A next-generation AUV energy system based on aluminum-seawater combustion [R], IEEE, 2002.
- [23] 郑邯勇. 铝/水推进系统的现状与发展前景 [J]. *舰船科学技术*, 2003, 25(5): 24-25.
- ZHENG Han-yong. Development of the aluminum-water power system [J]. *Ship Science and Technology*, 2003, 25(5): 24-25.
- [24] 江治, 李疏芬, 纳米铝粉在含能材料中的应用初探 [J]. *飞航导弹*, 2001, (9): 38-41.
- [25] Lutz A E, Kee R J, Miller J A. Sandia National Laboratories Report No. SAND87-8248, 1987.
- [26] McClean, R E, Kauffman, J W, Margrave, J L. Kinetics of the reaction  $Al + H_2O$  over an extended temperature range [J]. *Journal of Physical Chemistry*, 1993 97(3): 9673-9676.
- [27] 郭 K K, 萨默菲尔德. 固体推进剂燃烧基础 [M]. 朱荣贵等译. 北京: 宇航出版社, 1994.
- [28] Yetter R A, Dryer F L. Metal particle combustion and classification [C]. *Mico-gravity Combustion: Fire in Free Fall*, Academic Press, 2001: 419-478.
- [29] Green M J, Rapp D C, Roncace J. Flow visualization of a rocket injector spray using gelled propellant simulants [R]. AIAA 91-2198, 1991.

## Advances in Aluminum/Water Propellant

ZOU Mei-shuai, YANG Rong-jie, GUO Xiao-yan, CAO Chuan-bao, LI Jian-min

(School of Materials Science and Engineer, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The energy level, ignition, combustion of  $Al/H_2O$  and reaction mechanisms of Al with  $H_2O$  were reviewed. The applications of nano-aluminum and gelling agent in  $Al/H_2O$  propellant were discussed.

**Key words:** applied chemistry; aluminum/water propellant; ignition; combustion