

铝颗粒在多相流中燃烧的数值模拟*

刘丛林, 郜冶, 贺征

(哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要:铝颗粒的燃烧细节决定着推进剂的性能。应用 Fick 第一定律及 Fourier 定律, 对燃烧颗粒中各组分气体的质量与能量扩散过程进行计算, 跟踪氧化反应中生成的中间态产物, 总结了颗粒尺寸及组分随燃烧时间的变化规律, 以及颗粒的燃烧效率等。结果表明, 颗粒燃烧初期, 反应进行的较为强烈, 约 60ms 后, 燃烧趋于平稳, 最终, 颗粒 20% 以上的外表面被氧化物所覆盖。

关键词:固体火箭推进剂; 铝颗粒; 非稳态燃烧; 氧化帽

中图分类号: V435.12 **文献标志码:** A

The Numerical Simulation of Aluminum Droplet Combustion in Multi-phase Fluid

LIU Conglin, GAO Ye, HE Zheng

(College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, china)

Abstract: The aluminum droplet's burning detail is important for propellant capability. Based on Fick's first law and Fourier law, the mass and energy diffusion process between gases produced by burning aluminum droplet was computed. Following the track of the intermediate product, the development of droplet's size, component, and combustion efficiency were studied. Results show that in early process, the reaction is more intense. After 60 ms, the burning becomes placid. Finally, about 20% of the droplet surface is covered by the oxide cap.

Keywords: solid rocket propellant; aluminum droplet; transient combustion; oxide cap

0 引言

铝(Al)具有高密度和高反应热, 加入固体火箭推进剂中, 可以提高其密度和流场温度, 提升发动机比冲。

铝颗粒对推进剂性能的影响主要取决于燃烧的细节, 众多学者对其进行了大量的理论分析和实验研究。但目前已有的模型尚不能描述燃烧中凝相产物的生长过程, 无法体现凝相对颗粒燃烧的影响。从单颗粒入手, 合理简化环境条件, 利用 Fick 定律和 Fourier 定律, 分析燃烧中的热质传递规律, 可较为详细的描述铝颗粒在多相热流场中的燃烧行为, 为发动机设计提供参考。

1 计算方法

1.1 铝颗粒的燃烧结构

据实验观察, 稳态情况下铝颗粒附近的燃烧区呈

球对称结构^[1]。燃烧过程大致分为 3 个步骤: 铝蒸发变为气态—初步形成低能氧化物—最终凝聚为三氧化二铝(Al_2O_3)^[2]。

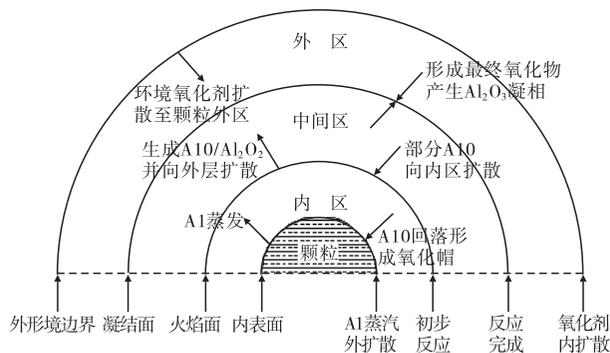


图1 铝颗粒燃烧结构图

计算中进一步假设: 颗粒表面、火焰面、凝结面和外环境边界 4 个无限薄的界面将颗粒附近划分为燃烧内区、燃烧中间区与燃烧外区 3 个区域。图 1 为铝颗粒的燃烧结构示意图。所有的化学反应均在界面处迅速发生并反应完毕, 各组分气体受扩散作用流通

* 收稿日期: 2011-10-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(HEUCF100201)资助

作者简介: 刘丛林(1981-), 女, 吉林人, 博士研究生, 研究方向: 固体火箭发动机燃烧与流动。

于不同区域,同时传递质量与能量。

1.2 铝颗粒燃烧原理

燃烧产生的各气相组分质量扩散过程遵循 Fick 定律原则:

$$\dot{m}_j = -4\pi r^2 \rho D(1 - \beta) \frac{dY_j}{dr} + \dot{m}_{\text{net}} \cdot Y_j \quad (1)$$

各气相组分的能量传递过程遵循 Fourier 定律原则:

$$H_F = -4\pi r^2 \rho a(1 - \beta) \bar{c}_p \frac{dT}{dr} + \left(\sum \dot{m}_j c_{p,j} \right) (T - T_0) + \sum \dot{m}_j h_j^0 \quad (2)$$

其中, β 表示颗粒表面被氧化物所覆盖的百分比, 设燃烧区内气体路易斯数 (Le) 为 1。

各区域内不同组分气体的质量流量还应遵循化学反应当量比的关系。此外, 由铝颗粒的燃烧实验可以得到颗粒近表面处 AlO 的流量与环境压力及气体组分浓度间的关系、铝蒸气压力函数和燃烧中生成的单质 AlO 与二聚物 Al_2O_2 质量分数比的经验式:

$$-\dot{m}_{\text{Al}_2\text{O}_2, \text{Inner}} = v \frac{3653r_{\text{surf}}^2 P(1 - \beta)(Y_{\text{AlO}, \text{surf}}/43)}{\sqrt{T_{\text{surf}}} \sum Y_{j, \text{surf}}/MW_{j, \text{surf}}} \quad (3)$$

$$P(Y_{\text{Al}, \text{surf}}/27) / \left(\sum Y_{j, \text{surf}}/MW_j \right) = \exp(12.43 - 34680/T_{\text{surf}}) \quad (4)$$

$$Y_{\text{AlO}, \text{FZ}} / (Y_{\text{AlO}, \text{FZ}} + Y_{\text{Al}_2\text{O}_2, \text{FZ}}) = 0.122 + 0.000577(T_{\text{FZ}} - 3500) \quad (5)$$

1.3 多相流中铝颗粒非稳态燃烧模型

将以上质量、能量、各组分气体化学反应当量及经验式联立, 可求解各组分气体的质量流量, Al 的消耗率以及 Al_2O_3 的生成率等。但处于燃烧态的铝颗粒实际上是一种熔融态的液滴, 而液滴在异质气体环境中的蒸发速率取决于扩散率^[3-4], 且蒸发的同时进行着传热传质过程。可以说流动、传热和传质相互耦合, 作用于颗粒燃烧的全过程^[5]。

两相流中铝颗粒的燃烧环境是不断变化的, 流场温度和环境氧化剂浓度是时间和空间位置的函数。计算中考虑了环境的变化, 针对反应进行的程度, 及时更新流场中温度、氧化剂浓度和燃气比热容等物性参数。

在铝颗粒的燃烧计算中, 凝相产物的处理是不可回避的重要问题。目前尚没有在实验中观察到气态的 Al_2O_3 , 普遍认为 Al_2O_3 会在颗粒附近迅速凝结为尺寸极其微小的液滴^[6], 成为“卫星颗粒”。随着卫星颗粒的增长, 颗粒外表面被覆盖的面积越来越大, 导

致颗粒的燃烧效率不断下降。计算中假设凝相以圆球状粘结于颗粒表面, 以 90° 角与原颗粒相切。

2 物理模型

以 AP: Aluminum: HTPB 比例为 75:15:10 的典型固体火箭发动机推进剂为背景, 研究了初始半径 r_0 为 $100\mu\text{m}$ 的铝颗粒在发动机多相热流场中的非稳态燃烧过程。

燃烧室内压力 P 为 25atm, 原始颗粒表面覆盖有 $1\mu\text{m}$ 厚的氧化层, 假设当颗粒开始燃烧时, 氧化层迅速凝聚为球体而粘结于颗粒表面。计算中设定颗粒凝结面温度为 4000K, 颗粒燃烧的环境边界为初始半径的 10 倍。

3 结果及分析

记颗粒开始燃烧时刻为 t_0 , 当原颗粒中 98% 的铝成分被消耗后, 判定燃烧过程结束。计算表明, 初始半径为 $100\mu\text{m}$ 的铝颗粒在多相流环境中的燃烧活动持续了 90ms, 与 Melcher 的实验结果相一致^[7]。

3.1 两相流燃烧环境变化过程分析

随着颗粒燃烧活动的进行, 颗粒周围环境中的气体氧化剂逐渐渗入到颗粒近表面, 环境边界处各气体成分不断发生变化。图 2 ~ 图 5 反映了颗粒周围主要气体成分质量百分数随颗粒燃烧时间的变化规律: 一方面, 随着颗粒燃烧活动的进行, 作为氧化剂的二氧化碳和水不断消耗, 百分含量逐渐减少; 另一方面, 颗粒燃烧时, 不断有产物生成, 因此, 一氧化碳和氢气的质量分数呈不断增加的趋势。

环境中的惰性气体不参与燃烧过程, 但质量分数将随

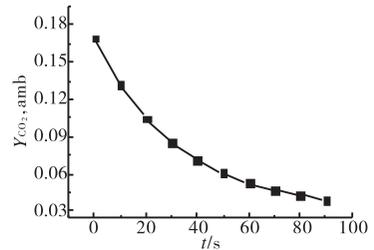


图 2 环境中二氧化碳质量分数变化规律

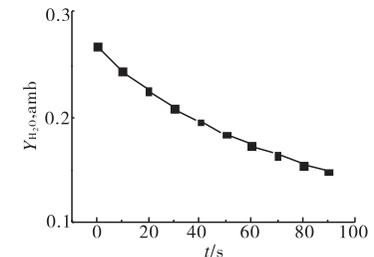


图 3 环境中水蒸气质量分数变化规律

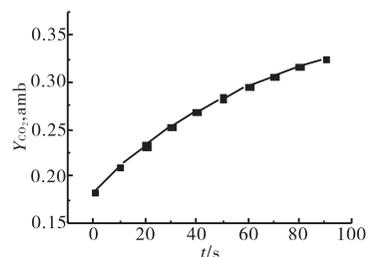


图 4 环境中一氧化碳质量分数变化规律

其他气体成分的变化而发生改变,其变化趋势反映了颗粒燃烧过程中周围气体的综合变化情况,有利于对颗粒在各时刻的燃烧状态做出判断。图 6 表明:在燃烧初期,环境中惰性气体的质量分数急剧增加,氧化剂消耗量大于燃烧产物的发生量。约 60ms 后,曲线趋于平缓,氧化剂消耗量与燃烧产物的发生量基本持平,燃烧活动趋于平稳。

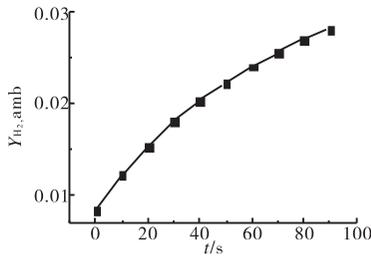


图 5 环境中氢气质量分数变化规律

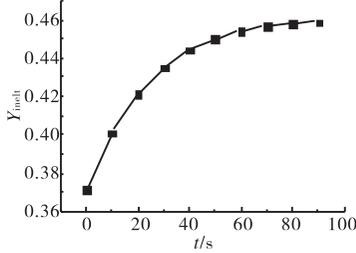


图 6 环境中惰性气体质量分数变化规律

图 7 反映了颗粒周围的环境温度 T_{amb} 随时间的变化规律:燃烧开始后,随着化学反应的进行,颗粒释放出大量热,环境温度急剧上升。 $t = 20ms$ 时,曲线斜率达

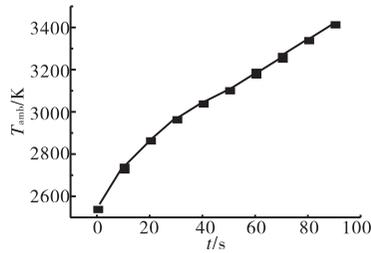


图 7 环境温度变化规律

11.5,升温很快,而 $t = 40ms$ 时,斜率仅为 6.79,至 $t = 60ms$ 时,斜率变为 7.95,升温速率有所回升,但与初期相比,上升速度有所降低。可见,在颗粒燃烧过程中,存在着一个升温的停滞期。

3.2 颗粒成分变化过程分析

在颗粒的燃烧过程中 Al 与 Al_2O_3 两种成分呈现出此消彼长的状态。图 8 表明,Al 直径呈直线下降趋势,曲线斜率几乎保持不变。但 Al_2O_3 直径却并非呈如此,燃烧开始 60ms 后,曲线斜率由之前的 0.55 锐减至 0.2, Al_2O_3 生成速度有所减缓。

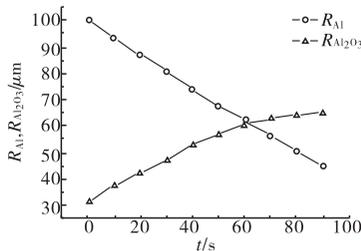


图 8 铝及氧化铝颗粒半径变化规律

的改变而缩小,变化规律如图 9 所示。燃烧初期,火焰面半径接近 $400\mu m$,凝结面与火焰面相距较远,其半径是火焰面的 2.16 倍,大于 $800\mu m$ 。随燃烧的进行,两个特征半径逐渐接近,至燃烧结束时,凝结面仅为火焰面的 1.35 倍,二者已经几乎重合。

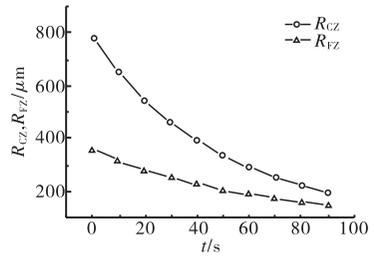


图 9 颗粒火焰面与凝结面半径变化规律

3.3 颗粒燃烧效率分析

燃烧中的颗粒成分时刻发生着改变,Al 与 Al_2O_3 的质量比取决于它们的消耗率和生成率。由图 10 可知,随燃烧的进行,二者质量均不断降低,但 Al 的消耗率始终大于 Al_2O_3 的生成率,所以颗粒的整体尺寸仍是不断减小的。燃烧开始后 40ms 左右,Al 的消耗率突然增大,说明此时燃烧较为剧烈,这一现象在图 6 惰性气体的变化中也有所体现。

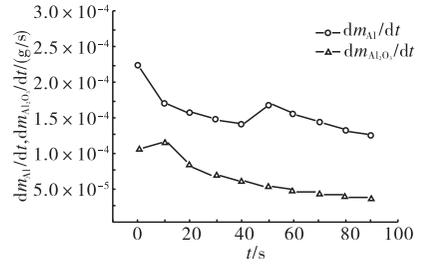


图 10 铝及氧化铝质量变化规律

随着 Al_2O_3 的不断生成,颗粒外表面越来越多地被覆盖,导致 Al 与氧化剂接触的总面积越来越小,从而影响其消耗速率。图 11 反映了颗粒表面

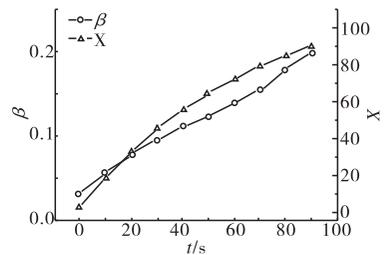


图 11 颗粒表面覆盖度及铝消耗率

氧化物覆盖度 β 与 Al 的消耗率 X 随时间的变化关系。计算表明,当燃烧结束时,颗粒中 20% 以上的外表面被 Al_2O_3 所覆盖。Al 的消耗速率虽然呈不断上升趋势,但曲线斜率不断减小,说明燃烧过程中,随颗粒表面越来越多地被 Al_2O_3 所覆盖,Al 的燃烧速率受到了一定程度的制约。

4 结论

利用 Fick 质量扩散定律及 Fourier 热量扩散定律,可较为详细的计算燃烧中铝颗粒的尺寸及组成成

颗粒燃烧区的火焰面与凝结面半径随颗粒直径

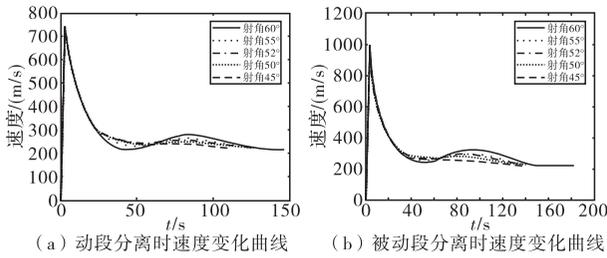


图 4 不同射角主动段分离、被动段分离速度曲线对比

2.3 主动段分离、被动段分离射程覆盖范围分析

为了对比分离点分别在主动段和被动段时射程覆盖范围差异,在 $20^\circ \sim 56^\circ$ 射角、 $400 \sim 800\text{m/s}$ 分离速度范围内进行弹道仿真,得到整个射角范围内射程与分离速度的关系如图 5 所示。

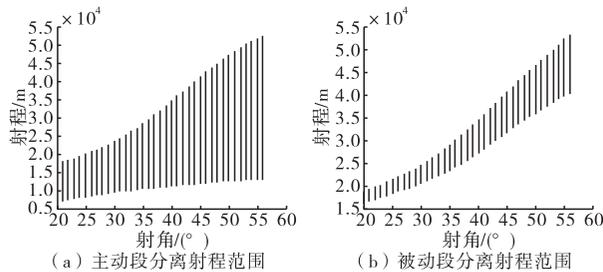


图 5 主动段分离与被动段分离射程覆盖对比

图 5 中的竖直线表示同一射角下分离速度取 $400 \sim 800\text{m/s}$ 时射程的变化,由图可以看出,不管是主动段分离还是被动段分离,射角越大通过调整分离速度能取得的射程范围越大,但主动段分离时的射程覆盖范围更大,最大射程两者接近。

3 结论

某制导火箭弹发动机分离点可以选择在主动段

和被动段,对这两种情况对其外弹道的影响在建立纵向运动数学模型的基础上进行了仿真分析,分别分析了两种情况下的外弹道特性,以及不同分离点对射程覆盖的影响。通过以上研究得出以下结论:

- 1) 相同射角、相同分离速度,发动机主动段分离与被动段分离相比射程、射高和最大速度都要小;
- 2) 不管主动段分离还是被动段分离,对弹道末端弹体着地速度没有影响;
- 3) 在整个射角和分离速度范围内,主动段分离射程覆盖范围要大于被动段分离,而所能达到的最大射程差别不大。

通过以上研究为最终确定分离点的位置提供了依据,分离点位置确定则弹道模型随之确定,为研究该制导火箭弹的外弹道提供了可用的弹道模型。

参考文献:

[1] 钱杏芳,林瑞雄,赵亚男. 导弹飞行力学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2008.

[2] 韩子鹏. 弹箭外弹道学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2008.

[3] 袁子怀,钱杏芳. 有控飞行力学与计算机仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2001.

[4] 赵军民,何亚娟. 基于 MATLAB/Simulink 的弹道仿真模块化设计[J]. 弹箭与制导学报,2007,27(1): 147 - 149.

[5] 孙鹏,赵捍东,曹红松. 基于 Vega 的高炮外弹道视景仿真系统设计与实现[J]. 弹箭与制导学报,2011,31(6): 215 - 218.

[6] 杨超,王锋,聂仙娥. 基于 Matlab 的弹道修正弹药仿真[J]. 弹箭与制导学报,2011,31(5): 138 - 140.

(上接第 120 页)

分变化过程,以及有凝相回落的情况下,颗粒燃烧效率的变化规律。

计算表明,在燃烧初期,氧化剂消耗量大于燃烧产物的发生量,约 60ms 后,二者基本持平,燃烧活动趋于平稳。燃烧初期,凝结面与火焰面相距较远,至燃烧结束时,两个特征半径几乎重合。燃烧过程中,存在着一个升温的停滞期。最终,颗粒 20% 以上的外表面被 Al_2O_3 所覆盖。

参考文献:

[1] Dreizin W L, Trunov M A. Surface phenomena in aluminum combustion[J]. Combustion and Flame, 1995, 101(3): 378 - 382.

[2] Merrill K King. Aluminum combustion in a solid rocket mo-

tor environment[J]. Proceedings of the combustion institute, 2009, 32(2): 2107 - 2114

[3] S L Soo. Dynamics of charged suspensions[R]. Topics in Current Aerosol Research, Pergamon, 1971.

[4] S L Soo, Fluid dynamics of particulate systems[R]. Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Lectures, 1973.

[5] Widener J F, Liang Y, Beckstead M W. Aluminum combustion modeling in solid propellant environments, AIAA 99 - 0449[R].

[6] 曹泰岳,张为华,王宁飞. 轻金属颗粒燃烧理论研究进展[J]. 推进技术,1996,17(2):82 - 87.

[7] Melcher J C, Burton R L, Krier H. Combustion of aluminum particles in solid rocket motor flows[C]// 36th JANNAF combustion meeting, Vol. I, CPIA691, 1999: 249 - 258.