

环境条件对铝粉颗粒燃烧产物 凝聚的影响*

国防科技大学 张 炜** 曹泰岳 王宁飞 张为华 朱 慧

【摘要】 采用金属颗粒蒸汽相扩散燃烧模型和燃烧产物多相成核理论,对铝粉燃烧所形成的 Al_2O_3 平均粒径进行了计算研究。根据计算结果,就环境因素对铝粉燃烧区域中的温度、燃烧产物的过饱和度及其凝聚成核速率的影响规律进行了分析讨论。结果表明:环境压强增加,铝粉燃烧温度和液滴表面温度提高,铝粉燃烧产物平均粒径降低;环境压强对参数分布特性的影响比环境温度的影响更为显著。

主题词: 铝粉 燃烧产物 环境因素

分类号: V 512

目前, Al_2O_3 的粒度主要靠实验测量和经验公式预估^[1-3]。而用于预示铝粉燃烧产物尺寸的理论 and 模型研究成果则较少,仅有俄罗斯^[4]和美国^[3]等有少量的文献报道,在我国也刚刚开展这项研究工作^[5]。本文根据金属颗粒蒸汽相扩散燃烧模型和燃烧产物多相成核理论,建立具有多相凝结特性的轻金属燃烧模型,并就环境因素对铝粉燃烧产物尺寸的影响进行了研究。

1 基本模型

金属颗粒的蒸汽相扩散燃烧模型如图1所示。金属液滴蒸发汽化后向外扩散,当遇到由环境扩散来的氧时,在足够高的温度下金属将发生强烈的燃烧反应;同时反应形成的燃烧产物则从燃烧表面向两侧区域扩散。金属液滴与燃烧表面间的区域称为“一区”,而燃烧表面之外的区域称为“二区”。

在每一个区域,由质量守恒方程和能量守恒方程可得到区域内温度、燃烧产物和反应物应遵循的微分方程组。根据反应物和燃烧产物在金属液滴表面、燃烧表面和环境介质处的边界条件,对微分方程组积分即可得到下述关系:

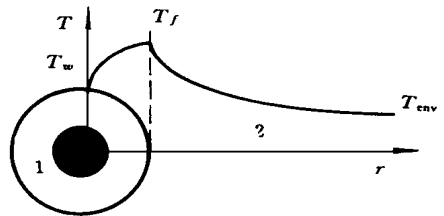


图1 燃烧模型结构简图

$$(A_1 - \theta)/(A_1 - \theta_w) = B_1/(B_1 - Y_{F,w}) = (1 - B_1 - Y_{p,i})/(1 - B_1 - Y_{p,w})$$

$$(A_2 - \theta_{env})/(A_2 - \theta) = (B_2 - Y_{O,env})/B_2 = (1 - B_2 - Y_{p,env})/(1 - B_2 - Y_{p,i}) \quad (1)$$

式中: A 为无因次温度特性参数, B 为无因次质量特性参数, Y 为质量分数, θ 为无因次温度;

下标 f 表示燃烧表面, w 表示金属液滴表面, env 表示环境外部介质, F 表示金属, O 表示氧, p 表示燃烧产物。由上式联立求解, 并考虑到在金属液滴表面和燃烧表面上的能量守恒条件, 即可求得金属液滴表面温度、燃烧表面温度及其它无因次特性参数。进一步求解微分方程组, 即可获得温度、燃烧产物质量分数和反应物质量分数的分布场。

根据均匀多相成核理论, 燃烧产物的凝聚成核速率为:

$$I = \alpha S \sqrt{2\sigma M_p / \pi N_A} (1/\rho_p^*) (P_p/kT)^2 e^{-\alpha} \quad (2)$$

式中: α 为凝聚系数, S 为燃烧产物的过饱和度, σ 为表面张力, N_A 为 Avogadro 常数, ρ^* 为密度, P_p 为燃烧产物的饱和蒸汽压, k 为 Boltzman 常数, T 为温度。

将上式积分得到燃烧产物的凝结总成核数, 最后即可计算出燃烧产物的平均粒径:

$$\delta = [(1 + 1/\beta) (\rho_F^* / \rho_p^*) (80k_r/C)]^{1/3} d^{-2/3} \quad (3)$$

式中: β 为金属—氧反应化学计量比, k_r 为金属颗粒燃速常数, C 比例常数, d 金属颗粒直径。

2 计算结果及讨论

2.1 环境压强对金属燃烧产物的平均粒径及参数分布场的影响

铝粉在环境中氧质量分数为 0.30、环境温度为 1500 K 条件下燃烧时, 其温度、燃烧产物过饱和度和燃烧产物凝聚成核速率分布曲线如图 2(a-c) 所示(图中 r_w 为 0.01 mm, 1: $P = 0.1$ MPa, 2: $P = 0.6$ MPa, 3: $P = 1.0$ MPa, 4: $P = 5.0$ MPa)。

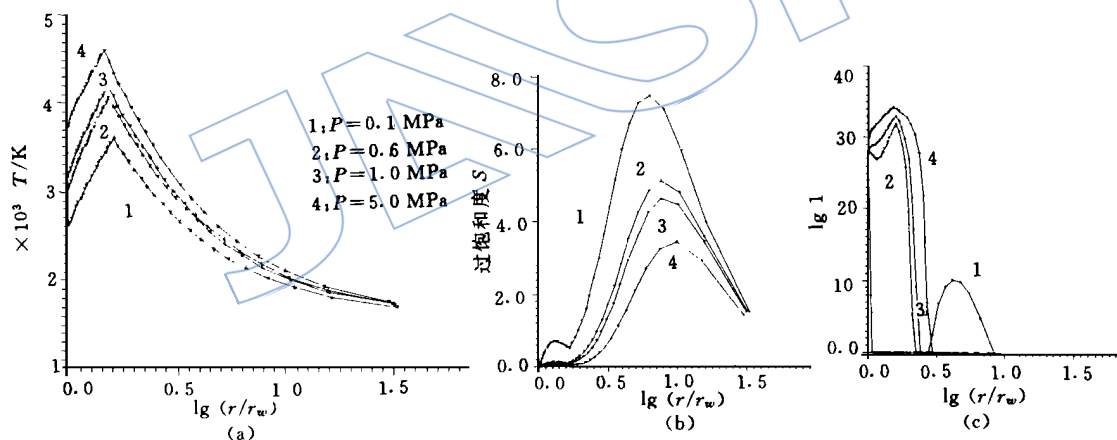


图 2 温度、燃烧产物过饱和度及其凝聚成核速率分布曲线图

从图 2 中可看出, 环境压强增加, 铝粉燃烧温度和液滴表面温度显著提高; 环境压强升高使燃烧产物过饱和度峰值降低; 但是, 环境压强对燃烧产物凝聚速率的影响则完全不同于常压环境。由图 2(c) 可看出, 常压下燃烧产物的凝聚速率有两个峰, 分别处于燃烧的两个不同区域; 但随着环境压强的升高, 燃烧产物凝聚主要在一区内进行。这是由于高压对燃烧产物扩散的抑制所致。而凝聚速率的急剧增加, 也导致了燃烧产物平均粒径的降低。

图 2(b) 表明, 金属燃烧产物的过饱和度在两个区域内的燃而附近分别出现峰值。但是, 燃烧产物凝聚成核速率的峰值分布则与其过饱和度峰值的位置不同。式(2)表示, 燃烧产物的凝聚成核速率应在较高的过饱和度及较低的温度下达到最大值。因此在常压下, 一区燃烧产物的

凝聚集中在金属液滴表面附近进行, 而二区燃烧产物则在距离燃面较远的区域凝聚(如图 2(c) 中的曲线 1 所示)。

2.2 环境温度对金属燃烧产物平均粒径及参数分布场的影响

铝粉在环境中氧质量分数为 0.30、环境温度为 2000 K 条件下燃烧时, 其温度、燃烧产物过饱和度分布曲线与环境温度为 1500 K 条件下分布曲线类似, 故不再列出。这说明与环境压强作用相比, 环境温度对反应区域温度和燃烧产物过饱和度分布的影响弱一些。但是环境温度变化对燃烧产物凝聚成核速率则有显著的影响。图 2(c) 和图 3($Y_{O, env} = 0.3$, $r_w = 0.01$ mm) 说明环境温度升高, 二区燃烧产物的过饱和度下降, 凝聚成核速率减小, 产物凝聚主要集中在一区进行。因此, 环境温度的影响类似于环境压强对燃烧产物凝聚成核速率的影响。

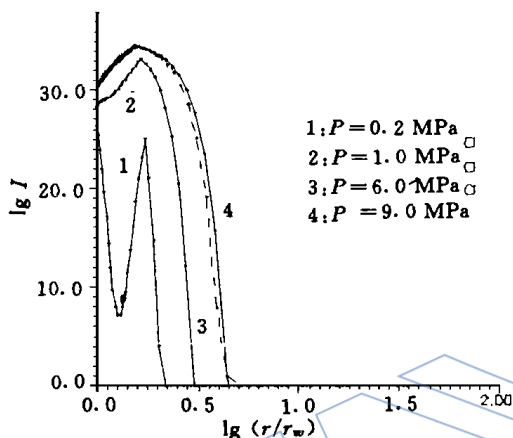


图 3 燃烧产物凝聚成核速率曲线

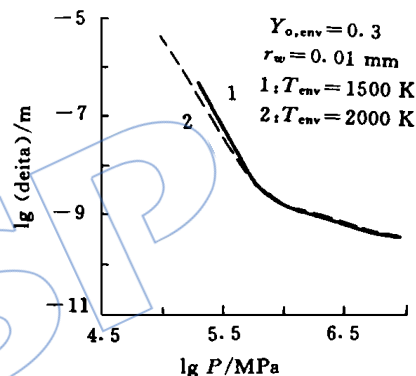


图 4 环境因素对燃烧产物平均粒径的影响

由不同环境温度的参数分布曲线比较可看出, 高压环境下压强对参数分布特性的影响要比环境温度的影响大得多, 这从图 4 所示中也可以看出。

3 结 论

对铝粉燃烧产物的平均粒径计算研究可看出: 环境压强增加, 导致铝粉燃烧温度和液滴表面温度显著提高, 燃烧产物过饱和度峰值降低, 燃烧产物集中在一区和燃烧表面区域内凝结, 铝粉燃烧产物的平均粒径降低; 环境压强对参数分布特性的影响比环境温度的影响更为显著。

参 考 文 献

- 1 Dawbarn R. Aluminum Oxide Particles Produced by Solid Rocket Motors NASA - CP - 2039
- 2 Hemsen R W. Aluminum Oxide Particle Size for Solid Rocket Motor Performance Prediction J. Spacecraft, 1981, 18 (6): 483
- 3 Brennan W D, et al Measured Particulate Behavior in a Subscale Solid Propellant Rocket Motor J. Propul Power, 1992, 8 (5): 954
- 4 Грнухов В П. Концентрация Дислокаций Продуктов Сгорания металлов в Частях ФГВ 1971, 12 (4): 519
- 5 曹泰岳等. 轻金属颗粒燃烧理论进展 推进技术, 1996, 17 (2): 82

(责任编辑 杨再荣)

performance of the atomizer with lower swirling strength is better than that of the atomizer with higher swirling strength near the atomizer exit, but downstream the both atomizers possess same atomization performance

Key Words Atomizing Measurements Drop size Fuel- nozzles

NUMERICAL SIMULATION FOR MATCHING DIFFUSER WITH LINER IN A SMALL DIRECT- FLOW COMBUSTOR

Li Ga iqi and Yan Chuan jun

(Zhuzhou Aviation Power Institute, Zhuzhou 412002)

ABSTRACT Numerical simulation was carried out for inside and outside flow-fields of the liner in a small direct- flow combustor with special structural arrangement, numerical tests of combustor performance were performed for matching of different diffusers with the liner. The program employs two- equations (K- ϵ model) to describe turbulent characteristics. The combustion following vaporization was simulated by a two- step chemical reaction combustion model. Arrhenius- EBU model was used to determine the reaction rate, and the air flow mass distribution was taken as a bridge to link the inside and outside flow-fields of the liner. The calculated results indicated that two strong recirculation zones emerged when air flowed into combustor annular cavity from pre-diffuser, the inside and outside flow fields were very unsymmetrical. The inclination of the pre-diffuser was an important geometrical parameter for the combustor performance.

Key Words Small turbine engines Combustion chambers Numerical simulation Flow fields

A STUDY ON EFFECTS OF ENVIRONMENTAL FACTORS ON ALUMINUM OXIDE PARTICLE SIZES

Zhang Wei, Cao Taiyue, Wang Ningfei, Zhang Weihui, Zhu Hui

(5th Dept. National University of Defense Technology, Changsha 410073)

ABSTRACT On the basis of diffusional combustion model of metal combustion and heterogeneous nucleation mechanism, the average particle sizes of the product Al_2O_3 in aluminum combustion were calculated. The results show that the temperatures on the combustion surface and on the metal surface increase with enhancing pressure, and the average particle size of the condensed product decreases as pressure increases. The effect of the pressure on the parameters is larger than that of the temperatures.

Key Words Aluminum powder Environmental factors Combustion products

CALCULATION OF 3D CASCADE FLOW WITH N- S EQUATION

Ji Lucheng and Zhou Sheng

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT A cell- centered finite volume method was developed to solve Reynolds- averaged Navier- Stokes equation with Jameson's Runge- Kutta scheme. In its