含铝固体燃料冲压发动机工作性能分析 *

张 宁[1]，史金光[1]，王中原[1]，马晔璇[2]

（1. 南京理工大学 能源与动力学院，江苏 南京 210094；
2. 北京动力机械研究所，北京 100074）

摘 要：为探究含铝固体燃料冲压发动机的燃烧特性和工作性能，基于纳米铝颗粒和端羟基聚丁二烯（HTPB）的混合固体燃料，采用雷诺转捩模型、颗粒表面反应模型和涡概念耗散模型，建立了二维两相湍流燃烧模型；数值计算分析了含铝固体燃料冲压发动机内流场，以及不同含铝质量分数和粒径下的燃面退移速率、推力与比冲。结果表明：发动机的进气条件对颗粒相的燃烧与运动起主导作用；与纯HTPB推进剂相比，添加质量分数为5%的铝颗粒能够提高补燃室压强和温度，增大燃烧室内高温区面积，可使推进剂平均燃面退移速率提高18.53%，发动机推力提高21.37%，密度比冲提高2.38%，适当增加铝颗粒含量或减小粒径，对提高推进剂燃面退移速率、发动机推力和密度比冲具有积极作用。

关键词：固体燃料冲压发动机；含铝推进剂；燃面退移速率；推力；比冲

中图分类号：V435 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-4055（2022）06-200781-09

DOI：10.13675/j.cnki. tjjs. 200781

Performance Analysis of Aluminized Solid Fuel Ramjet

ZHANG Ning[1]，SHI Jin-guang[1]，WANG Zhong-yuan[1]，MA Ye-xuan[2]

（1. School of Energy and Power Engineering，Nanjing University of Science and Technology，Nanjing 210094，China；
2. Beijing Power Machinery Institute，Beijing 100074，China）

Abstract：In order to investigate the combustion characteristics and working performance of aluminized solid fuel ramjet（SFRJ），a two-dimensional two-phase turbulent combustion model is established based on the mixture of aluminum nanoparticles and hydroxyl terminated polybutadiene（HTPB）using Reynolds transition model，particle surface reaction model and vortex concept dissipation model. The flow field in the ramjet with aluminum solid fuel，and the regression rate of burning surface，thrust and specific impulse with different aluminum content and particle size were analyzed numerically. The results show that the intake conditions of SFRJ play a leading role in the combustion and movement of the particulate phase. Compared with pure HTPB propellant，the addition of 5wt% aluminum particles can increase the pressure and temperature of the afterburner，increase the area of the high temperature zone in the chamber. It also can increase the average regression rate of burning surface by 18.53%，the thrust by 21.37%，and the density specific impulse by 2.38%. Appropriately increasing the content of Al particles or decreasing the particle size can improve the regression rate of burning surface，thrust and density specific impulse of propellant.

Key words：Solid fuel ramjet；Aluminized propellants；Regression rate；Thrust；Specific impulse

* **收稿日期**：2020-10-08；**修订日期**：2021-02-03。
基金项目：国防预先研究项目（3020802010302）。
作者简介：张 宁，博士生，研究领域为弹箭推进增程理论与技术。
通讯作者：史金光，博士，研究员，研究领域为弹箭飞行理论与控制技术。
引用格式：张 宁，史金光，王中原，等. 含铝固体燃料冲压发动机工作性能分析[J]. 推进技术，2022，43(6)：200781.
（ZHANG Ning，SHI Jin-guang，WANG Zhong-yuan，et al. Performance Analysis of Aluminized Solid Fuel Ramjet[J]. *Journal of Propulsion Technology*，2022，43(6)：200781.）

1 引 言

近年来随着固体燃料冲压发动机(SFRJ)对推力、比冲等性能要求的不断提高,含金属燃料复合固体推进剂逐步受到重视,纳米铝粉更因具有燃烧完全、抗凝聚性好和成本低等优点得到了广泛关注。纳米铝粉与普通铝粉在推进剂燃烧表面有着不同的物理和化学过程[1]。后者因为粘滞力作用,在推进剂燃烧表面熔化形成液滴,并部分团聚成100μm左右的大颗粒微团,在气流的作用下离开燃烧表面,进入气相区缓慢燃烧[2];而前者倾向于单颗粒燃烧[3]。

由于纳米铝颗粒在燃烧过程中非均相燃烧和均相燃烧相互耦合、相互影响,很难进行简单精确的分析,目前主要依靠实验手段进行研究。文献[4]通过激波管实验发现纳米铝粉在燃烧过程中主要以非均相表面反应为主。文献[5]发现,纳米铝在燃烧过程中不存在颗粒的破碎过程,并且在反应过程中,铝会向外扩散与氧化物在外层发生反应生成氧化铝,使得颗粒变为中空结构。

文献[6]发现,直径为100nm的单个铝颗粒,在温度为1200~2200K、压力为0.4~3.2MPa的氧气或二氧化碳环境中燃烧的时间不到1ms,这保证了其能够在发动机内释放大部分的能量。文献[7]对煤油基凝胶与不同质量分数纳米颗粒混合推进剂的燃烧进行分析,发现含有5%纳米铝的推进剂特征速度效率最高。文献[8]对含质量分数为21%纳米铝颗粒的浆体推进剂开展了试验研究,对比分析了浆体燃料与纯净燃料的燃烧性能差异。文献[9]向四环庚烷中添加质量分数为15%的纳米铝颗粒后,发现其燃烧效率和质量比冲略有下降,但密度比冲有所提高。

目前国内外对含纳米铝粉固体燃料的燃烧特性开展了大量研究,但是由于进气道的存在,冲压发动机燃烧室内具有较大的速度和湍流强度[10],这使得实验测量难以获得除局部气体温度和压力以外的其他详细特性。

本文基于某冲压发动机的结构,结合纳米铝粉的燃烧理论,采用雷诺转捩模型、涡概念耗散模型和颗粒表面反应模型,建立含铝复合推进剂燃料的二维两相湍流燃烧模型,并与文献[11]中的实验数据对比,验证该计算模型的可行性,在此基础上,重点对含铝固体燃料冲压发动机的内流场结构、燃烧特性与工作性能进行计算与分析。

2 数值模拟方法

2.1 物理模型和边界条件

冲压发动机的物理模型如图1所示,图中a面表示进气道入口截面,直径为35mm;b~c表示燃烧室段,长度为350mm;c~d为圆孔隔板,厚度为3mm;d~e表示补燃室段,长度为365mm;e~f表示尾喷管,喉部直径为24mm。

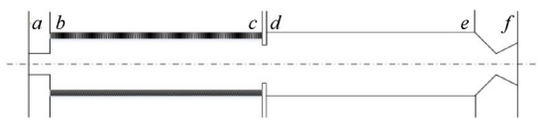


Fig. 1 Physical model

采用结构网格对流场区域进行划分,如图2所示,为保证近壁面处参数的准确性,在近壁面处对网格进行加密。设定发动机入口为质量入口,总温540K,总压0.78MPa,来流空气质量流率0.4kg/s;喷管出口边界条件为压力出口;壁面为绝热壁;对称轴设定为对称边界。

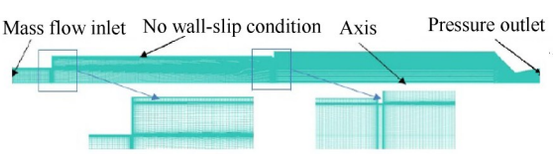


Fig. 2 Mesh of simulation cases

2.2 基本假设

含铝固体燃料冲压发动机内流场的流动十分复杂,包括热传导、辐射换热和对流换热等热量传递,化学反应发生在气相、固相和气固相之间,因此为简化仿真过程,获得内流场的主要特性,作如下假设:

(1)发动机内气体为理想气体,满足理想气体状态方程;

(2)固体燃料内表面为流-固耦合传热交界面,固体燃料外表面和其他壁面为绝热壁面,整个流场与外界无热交换;

(3)HTPB的热解产物为丁烯单质(C_4H_6);

(4)不考虑铝颗粒在推进剂内的变化过程,脱离燃面进入流场的铝颗粒直径服从正态分布,每个颗粒中含有12%的Al_2O_3[12-13];

(5)不考虑两相流对喷管的烧蚀作用与颗粒的堆积。

2.3　计算模型

2.3.1　气相控制方程

控制方程选用定常带化学反应的轴对称雷诺时均Navier-Stokes方程，如式(1)所示。

$$\frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial x}+\frac{\partial \boldsymbol{G}}{\partial r}+\frac{\boldsymbol{G}}{r}-\frac{\boldsymbol{H}}{r}=0 \tag{1}$$

其中

$$\boldsymbol{F}=\begin{bmatrix}\rho\\ \rho u^2-\sigma_{xx}\\ \rho uv-\tau_{xr}\\ \rho ue+\dot{q}_x-\sigma_{xx}u-\tau_{xr}v\\ \rho um_j-\varepsilon_x\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{G}=\begin{bmatrix}\rho v\\ \rho uv-\tau_{xr}\\ \rho v^2-\sigma_{xx}\\ \rho ue+\dot{q}_r-\sigma_{rr}v-\tau_{xr}u\\ \rho vm_j-\varepsilon_r\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ -\sigma_{\mathrm{t}}\\ 0\\ R_jr\end{bmatrix}$$

$$\sigma_{xx}=-p-\frac{2}{3}(\mu+\mu_{\mathrm{t}})\nabla\cdot U+2(\mu+\mu_{\mathrm{t}})\frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\sigma_{rr}=-p-\frac{2}{3}(\mu+\mu_{\mathrm{t}})\nabla\cdot U+2(\mu+\mu_{\mathrm{t}})\frac{\partial u}{\partial r}$$

$$\sigma_{\mathrm{t}}=-p-\frac{2}{3}(\mu+\mu_{\mathrm{t}})\nabla\cdot U+2(\mu+\mu_{\mathrm{t}})\frac{v}{r}$$

$$\nabla\cdot U=\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial r}-\frac{v}{r}$$

$$\tau_{xr}=(\mu+\mu_{\mathrm{t}})\left(\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)$$

$$\dot{q}_x=-c_p\left(\frac{\mu}{Pr}+\frac{\mu_{\mathrm{t}}}{Pr_{\mathrm{t}}}\right)\frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\dot{q}_r=-c_p\left(\frac{\mu}{Pr}+\frac{\mu_{\mathrm{t}}}{Pr_{\mathrm{t}}}\right)\frac{\partial T}{\partial r}$$

$$e=c_vT+\frac{1}{2}\left(u^2+v^2\right)$$

$$\varepsilon_x=D_j\frac{\partial m_j}{\partial x}$$

$$\varepsilon_r=D_j\frac{\partial m_j}{\partial r}$$

式中x为轴向坐标，r为径向坐标，u为轴向速度，v为径向速度，μ为分子粘性系数，μ_{t}为湍流粘性系数，Pr为普朗特数，m_j为组分质量分数，R_j为化学反应速率，D_j为组分扩散速率，j为流动维数。

2.3.2　湍流模型

由于冲压发动机的内部流场中包含由不连续尖锐几何形状引起的转捩流动区域[14]，因此湍流模型选择适用于大速度梯度与近壁面气体转捩流动的间歇性转捩模型，其输运方程为

$$\frac{\partial(\rho\gamma)}{\partial t}+u_j\frac{\partial(\rho v_j\gamma)}{\partial x_j}=P_\gamma-E_\gamma+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_{\mathrm{t}}}{\sigma_\gamma}\right)\frac{\partial\gamma}{\partial x_j}\right] \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho\tilde{R}\mathrm{e}_{\theta\mathrm{t}})}{\partial t}+\frac{\partial(\rho v_j\tilde{R}\mathrm{e}_{\theta\mathrm{t}})}{\partial x_j}=P_{\theta\mathrm{t}}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\sigma_{\theta\mathrm{t}}(\mu+\mu_{\mathrm{t}})\frac{\partial\tilde{R}\mathrm{e}_{\theta\mathrm{t}}}{\partial x_j}\right] \tag{3}$$

式中γ为间歇因子；$\tilde{R}\mathrm{e}_{\theta\mathrm{t}}$为当地转捩动量厚度雷诺数；$u_j$为速度；$x_j$为坐标位置；$P_\gamma$与$P_{\theta\mathrm{t}}$为湍流模型的生成项；$E_\gamma$为耗散项；$\sigma_\gamma$，$\sigma_{\theta\mathrm{t}}$为扩散项系数。

2.3.3　颗粒相流动模型

颗粒运动采用随机轨道模型，即

$$\begin{aligned}\mathrm{d}u_{\mathrm{p}}/\mathrm{d}t&=(\bar{u}+u'-u_{\mathrm{p}})/\tau_{\mathrm{p}}\\ \mathrm{d}v_{\mathrm{p}}/\mathrm{d}t&=(\bar{v}+v'-v_{\mathrm{p}})/\tau_{\mathrm{p}}\end{aligned} \tag{4}$$

式中u_{p}，v_{p}为颗粒轴向、径向瞬时速度；$\bar{u}$，$\bar{v}$和u'，v'分别为气相在3个方向上的时均平均速度分量和脉动速度分量；τ_{p}为颗粒速度弛豫时间。

2.3.4　辐射模型

发动机工作过程中传热方式主要有对流传热和辐射传热两种。因此为准确描述发动机中的传热状况，本文选用离散坐标辐射(DO)模型[15]来模拟发动机中的辐射传热。

2.3.5　气相燃烧模型

空气进入燃烧室后，其中的O_2与C_4H_6发生燃烧反应，采用两方程反应模型，即

$$C_4H_6+3.5O_2\longrightarrow 4CO+3H_2O$$

$$CO+0.5O_2\longrightarrow CO_2$$

化学反应速率模型采用涡概念耗散模型。C_4H_6由药柱表面的热解反应产生，因此在数值模拟过程中，需要在药柱表面与流体域交界面的第一层网格加质，来模拟HTPB的热解。HTPB的热解速率与燃料表面的温度有关，符合Arrhenius公式，但由于铝颗粒在燃烧过程中与氧气反应生成的Al_2O_3会部分聚集在燃烧表面上[16]，使HTPB分解反应的指前因子减小，因此参考文献[17]，热解速率可修正为

$$\dot{r}=\frac{0.1}{0.1+\omega_{\mathrm{Al}}}A\mathrm{e}^{-E_{\mathrm{a}}/(RT_{\mathrm{w}})} \tag{5}$$

式中ω_{Al}为铝的质量分数，A为指前因子，E_{a}为活化能，T_{w}为固体燃料表面温度，可由气固分界面上的能量平衡方程求解[18]。

$$k\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{\mathrm{w}}=\rho_{\mathrm{s}}\dot{r}\left[C_{\mathrm{s}}(T_{\mathrm{w}}-T_0)+h_{\mathrm{v}}\right] \tag{6}$$

式中 k 为气相传热系数，$\left(\partial T/\partial r\right)_{\mathrm{w}}$ 为分界面气相一侧的温度梯度，C_{s} 为固相比热，T_0 为固相初温，h_{v} 为固体燃料气化热。

仿真过程中通过式(5)和式(6)迭代计算，即可计算得到燃速 $\dot{r}$ 及燃料壁面温度 T_{w}，HTPB 的主要物性参数如表 1 所示[19]。

Table 1　Main parameters of HTPB

Parameter	Value
ρ/(kg/m^3)	927
A/(m/s)	3.964(T<722K) 0.011(T>722K)
E_{a}/(J/mol)	55803(T<722K) 20523(T>722K)

2.3.6　颗粒相燃烧模型

假设铝颗粒为规则球状颗粒，其与 O_2、燃气中的 H_2O 和 CO_2 发生的化学反应为

$$4\mathrm{Al(g)}+3\mathrm{O_2}\longrightarrow 2\mathrm{Al_2O_3(s)}$$
$$4\mathrm{Al(s)}+3\mathrm{O_2}\longrightarrow 2\mathrm{Al_2O_3(s)}$$
$$2\mathrm{Al(g)}+3\mathrm{H_2O}\longrightarrow \mathrm{Al_2O_3(s)}+3\mathrm{H_2}$$
$$2\mathrm{Al(s)}+3\mathrm{H_2O}\longrightarrow \mathrm{Al_2O_3(s)}+3\mathrm{H_2}$$
$$2\mathrm{Al(g)}+3\mathrm{CO_2}\longrightarrow \mathrm{Al_2O_3(s)}+3\mathrm{CO}$$
$$2\mathrm{Al(s)}+3\mathrm{CO_2}\longrightarrow \mathrm{Al_2O_3(s)}+3\mathrm{CO}$$

对应的化学反应速率为[20-24]

$$\varepsilon_1=2.6\times10^{10}\exp(-71600/(RT)) \tag{7}$$
$$\varepsilon_2=0.26\exp(-71600/(RT)) \tag{8}$$
$$\varepsilon_3=1.14\times10^{12}\exp(-530000/(RT)) \tag{9}$$
$$\varepsilon_4=0.75\exp(-530000/(RT)) \tag{10}$$
$$\varepsilon_5=8.7\times10^{12}\exp(-303550/(RT)) \tag{11}$$
$$\varepsilon_6=0.84\exp(-303550/(RT)) \tag{12}$$

由于纳米铝颗粒燃烧属于非均相燃烧，因此可参考文献[25-28]，将铝颗粒的燃烧过程根据相变和化学反应分为三个阶段，如图 3 所示。

在第一阶段，铝颗粒被加热到熔化温度；在第二阶段，颗粒内温度持续升高，其内部压力也不断增加，使外部包覆层开裂[25]，部分气相铝析出，在颗粒附近与空气发生反应，生成的化合物与原有包覆层形成新的氧化层，包裹住颗粒[20,25,28]；在第三阶段，铝颗粒与空气发生反应，由于氧化层较厚，因此第三阶段的反应速率较慢[24,26-27]。同时，由于反应过程中气相铝向外扩散并在外层发生反应生成氧化铝，颗粒最终变成中空结构[5]，并转变为惯性颗粒。

采用颗粒表面反应模型来模拟铝颗粒燃烧[29-30]。当铝颗粒达到蒸发温度时，气相铝开始析出。选用常速率反应模型模拟该过程，假设挥发分以固定速率流出，即

$$-\frac{1}{f_{\mathrm{g}}(1-f_{\mathrm{w0}})m_{\mathrm{p0}}}\frac{\mathrm{d}m_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}=A_0 \tag{13}$$

式中 m_{p} 为颗粒质量；f_{g}=0.6 表示颗粒中可析出气相铝的质量分数；m_{p0} 为颗粒初始质量；f_{w0}=0.12 表示初始时刻颗粒中 Al_2O_3 的质量分数；A_0 为析出速率常数，依据文献[20]可估算 A_0=16.33s^{-1}。

气相铝析出后进入到流体中即与空气中的氧气、水蒸汽、二氧化碳发生反应，生成的 Al_2O_3 附着于颗粒表面，颗粒粒径发生如下变化，有

$$\frac{d_{\mathrm{p}}}{d_{\mathrm{p0}}}=1+(b_{\mathrm{p}}-1)\frac{(1-f_{\mathrm{w0}})m_{\mathrm{p0}}-m_{\mathrm{p}}}{f_{\mathrm{g}}(1-f_{\mathrm{w0}})m_{\mathrm{p0}}} \tag{14}$$

式中 d_{p0} 为颗粒初始直径，d_{p} 为颗粒当前直径，b_{p} 为颗粒的膨胀系数，依据文献[5,25]，b_{p}=1.5~2.0，本文取为 1.5。

在气相铝的挥发过程中，所引起的传热为

$$m_{\mathrm{p}}c_p\frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}=\psi S_{\mathrm{p}}(T_{\mathrm{a}}-T_{\mathrm{p}})+\frac{\mathrm{d}m_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}h_{\mathrm{f}}+\Phi \tag{15}$$

式中 c_p=1176.8J·kg^{-1} 为颗粒的定压比热容；S_{p} 为颗粒表面积；T_{p} 为颗粒温度；$\psi=5\mu_{\mathrm{g}}c_{p\mathrm{g}}/2d_{\mathrm{p}}$ 为对流传热系数，其中 μ_{g}，$c_{p\mathrm{g}}$ 为燃气的动力粘性系数和定压比热容；T_{a} 为环境温度；h_{f}=1.05×10^{7}J/kg 为铝蒸发潜热；$\Phi=S_{\mathrm{p}}\lambda_{\mathrm{p}}\zeta(T_{\mathrm{R}}^4-T_{\mathrm{p}}^4)$ 为辐射给热，其中 λ_{p}=0.2 为颗粒黑

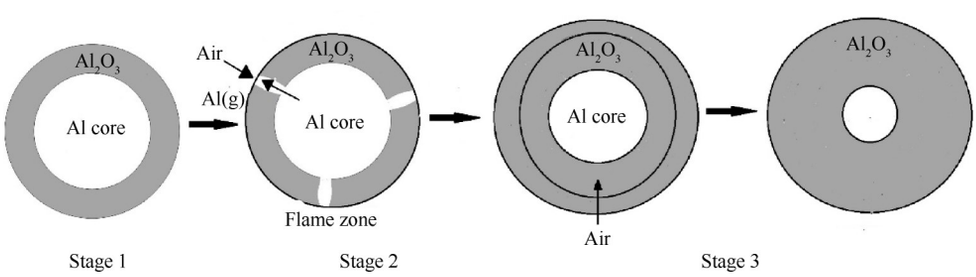


Fig. 3　Three stages of reaction between nano aluminum particles and air

度[31]，ζ=5.67×10^{-8}W/(m^2·K^4)为斯蒂芬孙-玻耳兹曼常数，T_R为辐射温度。

气相铝析出后，铝颗粒与氧气发生反应，其反应速率可表示为$\mathcal{R}=\xi_g R_c D_0/(D_0+R_c)$，其中$D_0$为扩散系数，$\xi_g$为平均反应气体物质浓度，$R_c$为化学反应速率系数。

在颗粒表面反应发生的过程中，其热平衡方程表达式为

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \psi S_p (T_a - T_p) - \varphi_h \frac{dm_p}{dt} q_{reac} + \Phi \quad (16)$$

式中q_{reac}为表面反应释放的热量，其中一部分(φ_h=0.4)热量被颗粒吸收，另一部分(1-φ_h)被加入到气相物质的能量方程中。当颗粒中的Al全部燃尽后，颗粒仅剩Al_2O_3，转变为惰性颗粒，其热平衡方程表达式为

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \psi S_p (T_a - T_p) + \Phi \quad (17)$$

颗粒相对燃气能量方程的影响，可通过将颗粒与燃气之间的热量交换加入燃气能量方程的源项进行描述，即

$$Q = Q_{gs} + Q_{gr} + Q_{gh} \quad (18)$$

式中$Q_{gs}=\psi S_p(T_p-T_a)$为相间对流传热量，$Q_{gr}=S_p\lambda_p\zeta(T_R^4 - T_p^4)$为辐射传热量，$Q_{gh}=(1-\varphi_h)\Delta m_{reac}q_{reac}$为表面反应产生的热量交换。

2.3.7　推力与比冲模型

由动量定理，固体燃料冲压发动机的推力为喷管出口射流与迎面气流的富裕冲量差，即

$$F = \dot{m}_f u_f - \dot{m}_a u_a + (p_f - p_a) S_f \quad (19)$$

式中$\dot{m}_a$为入口空气流率，u_a为入口空气速度，u_f为喷管出口排气速度，p_f为喷管出口压强，p_a为环境压强，$\dot{m}_f = \dot{m}_a + \dot{m}_b$，$\dot{m}_b$为入口燃料流率，$S_f$为发动机喷管出口面积。

质量比冲定义为单位推进剂的量所产生的推力，即

$$I_{sp} = F/\dot{m}_f \quad (20)$$

密度比冲也称体积比冲，定义为质量比冲I_{sp}与推进剂密度的乘积，即

$$I_{sp\rho} = I_{sp}\rho_p \quad (21)$$

2.4　收敛性分析

为验证网格数量收敛性，本文设计了4套网格来计算纯HTPB推进剂的平均燃速，网格总数分别为14万、18万、22万、26万，结果如表2所示。

Table 2　Grid convergence analysis

N	1.4×10^5	1.8×10^5	2.2×10^5	2.6×10^5
$\bar{r}$/(mm·s^{-1})	0.459	0.473	0.475	0.487

相对于26万网格数的计算结果，22万、18万、14万网格数的相对误差为2.46%，2.87%，5.75%。综合考虑计算精度与计算效率，选择网格数为18万的网格进行计算，其y^+如图4所示，满足文献[32](几何参数相似)中y^+<1的要求，可以保证近壁面相关参数的准确性。

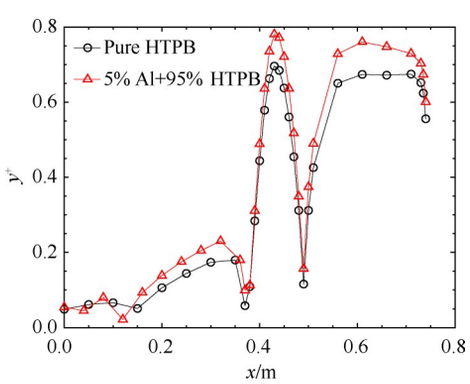


Fig. 4　y^+ profile of solid fuel surface

3　数值模拟结果与分析

3.1　数值方法验证

为验证本文采用的计算模型与方法的可靠性，在装药内径4mm、长180mm的发动机中，对平均粒径为500nm铝颗粒的HTPB固体燃料进行计算，得到该算例不同含铝质量分数下的平均燃面退移速率随氧气流量G_{ox}的变化值，与实验结果[10]对比如表3所示。计算数据$\bar{r}_{cal}$与实验数据$\bar{r}_{ref}$的绝对误差平均值为3.61%，吻合度较好，表明本文所用的数值计算方法对含铝固体燃料冲压发动机的仿真模拟合理可行。

Table 3　Average regression rate of HTPB propellant with 5wt% aluminum particles

G_{ox}/kg·m^{-2}·s^{-1}	375		150	
ω_{Al}/%	$\bar{r}_{ref}$/(mm·s^{-1})	$\bar{r}_{cal}$/(mm·s^{-1})	$\bar{r}_{ref}$/(mm·s^{-1})	$\bar{r}_{cal}$/(mm·s^{-1})
5	0.832	0.806	0.242	0.233
10	0.955	0.922	0.283	0.271
15	1.512	1.483	0.364	0.345

3.2　固体燃料冲压发动机内流场分析

含铝质量分数为 5%、平均粒径为 500nm 的推进剂与纯 HTPB 的流场温度云图以及流线图如图 5 所示。分析流线图可知，两工况附着区位置大致相同，且在发动机燃烧室入口后台阶以及补燃室隔板后台阶处都出现了回流区。由两者的温度云图对比可知，相较于纯 HTPB，含铝推进剂工况下，在燃烧室流场下游和补燃室轴线附近温度较高，且高温区面积较大，火焰面温度均在 2200 K 以上，在剪切层以及附着点附近，温度达到了 2400 K 以上。

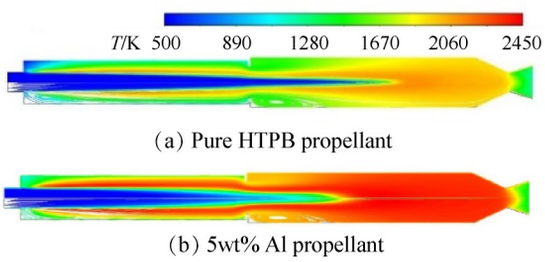


Fig. 5　Temperature nephogram and streamline of SFRJ

图 6 给出了颗粒相中 Al 的质量分数 ω，铝颗粒在燃气与来流空气的带动下，脱离推进剂表面，进入燃烧室内与氧气发生反应，生成 Al_2O_3 颗粒。在燃烧室和补燃室的回流区、燃料壁面等温度较低处，由于颗粒表面反应占据主导地位，因此反应速度较慢，Al 质量分数较大；而在火焰面、补燃室后部等温度较高处，气相铝不断析出，反应速度较快，Al 质量分数快速减小。在此过程中产生的颗粒相，将给冲压发动机带来燃面面积减小、残渣堆积和两相流损失等一系列问题。

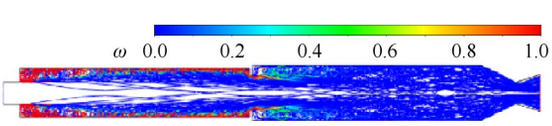


Fig. 6　Mass distribution of Al particles

从图 7 可看出颗粒相的轨迹始终贯穿发动机，结合流线图可知，颗粒相的运动受进气来流的运动影响严重，因为燃烧室轴线附近的气流速度较快，所以此处颗粒分布稀薄；而在燃烧室和补燃室后台阶回流区处流速较低，则出现了颗粒堆积的现象；在喷管下游近壁面处，由于颗粒相的速度与温度相对滞后，出现了粒子盲区。

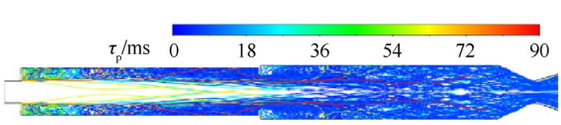


Fig. 7　Residence time of particle in ramjet

图 8 给出了颗粒相停留时间的频率直方图，其中，纵轴表示颗粒相停留时间频率与组距的比值，颗粒相的平均停留时间约为 18ms，与文献[33]的典型停留时间数量级相符（发动机尺寸相似）。由于燃烧室和补燃室后台阶回流区的作用，铝颗粒最长停留时间可达 89ms。

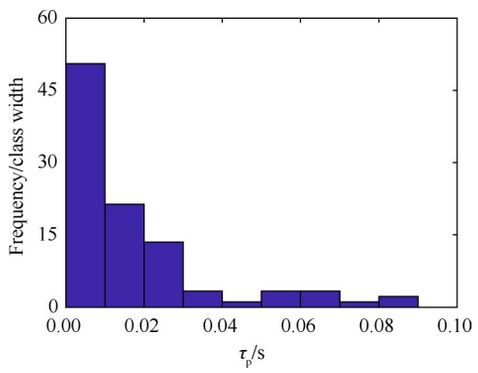


Fig. 8　Frequency histogram of particle residence time

图 9 为含铝固体燃料冲压发动机燃烧室与补燃室的湍流动能云图。分析云图可知，发动机燃烧室与补燃室的湍流动能较大，有利于加强发动机内的燃料和空气掺混效果，增大化学反应速率，同时也能够带动更多的 Al 颗粒脱离燃面进入燃烧室。将图 7、图 8 和图 9 相比照，进一步证明了进气来流对颗粒运动的主导作用。

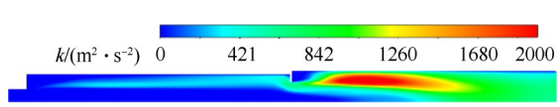


Fig. 9　Turbulent kinetic energy of ramjet combustor and second combustor

3.3　燃面退移速率分析

图 10 给出了含铝颗粒质量分数分别为 5% 和 10% 的推进剂与纯 HTPB 推进剂沿药柱表面燃面退移速率变化曲线，由图可知，它们的燃速均在回流区内快速增加，随后在再发展区逐渐平缓，并在燃烧室末端迅速降低。由于空气入口通道内径小于燃烧室内径，因此入口附近的氧气及形成的火焰层均离燃料壁面较远，燃速较低；但随着轴向距离的增加，火焰层快速外移至燃料壁面附近，传至燃料壁面的热量迅速增加，燃速也快速增加；随着轴向距离的进一步增加，火焰层缓慢变薄并逐渐趋于固体壁面，燃速缓慢增加；到达补燃室附近时，受隔板的扰流作用，火焰层向通道快速内缩，燃速急剧降低。

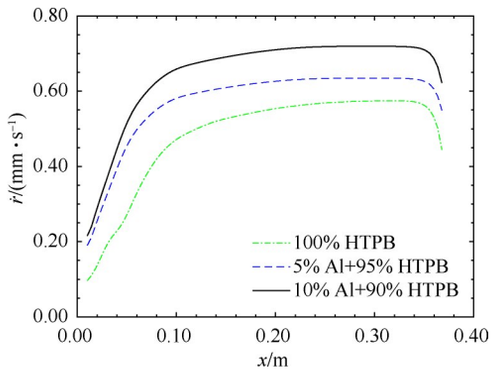


Fig. 10　Regression rate along the grain surface of aluminized propellant under different mass fractions

表 4 给出了铝颗粒平均粒径为 500nm 时，含铝质量分数分别为 5% 和 10% 的推进剂与纯 HTPB 推进剂的平均燃速，由表可知，两者的燃速分别较纯 HTPB 推进剂增长了约 18.53%，27.38%。由文献[34]推进剂与燃气间的平均对流换热系数可表示为 $\lambda \propto c_p^{0.23}(T_f - T_w)^{-0.77}\mu^{0.2}$，添加铝颗粒后燃气的比热容与粘度[35]均有所上升，而火焰与壁面温度差的平均值约较纯 HTPB 推进剂小 85.08K。因此，添加铝颗粒可以增强药柱表面与流体区域的换热效果，进而提高燃速。

Table 4　Average regression rate of aluminized propellant under different mass fraction

ω_{Al}/%	$\bar{r}$/(mm·s^{-1})
0	0.4725
5	0.5601
10	0.6019

表 5 给出了含铝质量分数为 5% 时，平均粒径分别为 200，500，1000nm 时推进剂的平均燃速，由表可知，前两者燃速较后者分别增长了约 5.56%，2.02%，这是因为，平均粒径小的铝颗粒具有更大的比表面积，反应活性更高，能量释放率更快，提高燃烧边界层的扩散火焰区向燃料表面的传热速率。

Table 5　Average regression rate of aluminized propellant under different particle size

d_{Al}/nm	$\bar{r}$/(mm·s^{-1})
200	0.5796
500	0.5601
1000	0.5490

3.4　推力和比冲分析

表 6 给出了铝颗粒平均粒径为 500nm 时，含铝质量分数分别为 5% 和 10% 的推进剂与纯 HTPB 推进剂的推力与比冲值，由表可知，两者推力分别较纯 HTPB 推进剂约大 21.37%，32.89%；质量比冲 I_{sp} 约小 1.19%，2.91%；密度比冲 I_{spp} 约大 2.38%，4.30%。由于发动机燃烧产物中存在氧化铝颗粒，这些固态颗粒并不能像燃气那样作膨胀功，相反地需要燃气来推动和加速它们，导致含铝燃料的质量比冲低于纯净 HTPB 燃料。但是由于金属颗粒的密度远高于 HTPB 燃料，因此加入铝粉会使固体燃料的密度比冲有所提高。

Table 6　Thrust and specific impulse of aluminized propellant under different mass fraction

ω_{Al}/%	F/N	I_{sp}/(N·s·kg^{-1})	I_{spp}/(N·s·m^{-3})
0	263.1609	9495	8.83×10^6
5	319.4146	9382	9.04×10^6
10	349.7062	9219	9.21×10^6

表 7 给出了含铝颗粒质量分数为 5% 时，平均粒径分别为 200，500，1000nm 时推进剂的推力与比冲，由表可知，前两者推力分别较后者增长了约 5.81%，2.19%，质量比冲 I_{sp} 提高了 0.22%，0.16%。

Table 7　Thrust and specific impulse of aluminized propellant under different particle size

d_{Al}/nm	F/N	I_{sp}/(N·s·kg^{-1})
200	330.5709	9387
500	319.4146	9382
1000	312.4194	9367

本文将铝颗粒的燃烧效率 η 定义为已燃铝颗粒质量与铝颗粒总质量的比值。表 8 给出了平均粒径为 500nm 时，含铝质量分数分别为 5% 和 10% 的推进剂中铝颗粒的燃烧效率。可以看出，后者较前者约小 8%。在低氧化剂质量流量条件下，提高推进剂中铝的含量，会降低铝颗粒的燃烧效率。同时，由于铝粉的不完全燃烧，使其在发动机内能量释放不足，造成发动机比冲的损失。

Table 8　Combustion efficiency of aluminized propellant under different mass fraction

ω_{Al}/%	η/%
5	64.72
10	56.35

4　结　论

本文基于纳米铝颗粒和 HTPB 的混合固体燃料，

采用雷诺转捩模型、颗粒表面模型和涡概念耗散模型,建立了二维两相湍流模型,数值计算获得了燃料的燃烧特性和发动机的工作性能,通过分析得到以下结论:

(1)不同含铝质量分数下,平均粒径为500nm铝颗粒的HTPB固体燃料的平均燃速仿真结果与相同工况下实验数据的绝对误差平均值为3.61%,吻合度较好,表明采用文中所述模型,可较好地模拟含铝复合推进剂在冲压发动机内的燃烧与流动过程。

(2)与纯HTPB推进剂相比,添加质量分数为5%的铝颗粒能够提高补燃室压强和温度,增大燃烧室内高温区面积,且可使推进剂平均燃速提高18.53%,发动机推力提高21.37%,质量比冲降低1.19%,密度比冲提高2.38%。

(3)当铝颗粒含量一定时,燃料的燃速、发动机的推力和比冲随粒径的增加而减小;当铝颗粒粒径一定时,燃料的燃速、发动机的推力和比冲随含量的增加而增加。但与铝颗粒含量相比,粒径对燃速、推力和比冲的影响较小。因此,适当增加铝颗粒含量或减小粒径,有助于提升发动机的工作性能。

(4)发动机的进气条件对颗粒相的燃烧与运动起主导作用;燃烧产物中的颗粒相Al_2O_3,对发动机的工作性能具有不利影响,在低氧化剂质量流量条件下,提高推进剂中铝的含量,会降低铝颗粒的燃烧效率,造成发动机比冲的损失。因此在贫氧条件下,在推进剂中适当添加氧化剂,有助于提高铝颗粒的燃烧效率,减小发动机比冲的损失。

致 谢:感谢国防预先研究项目的资助。

参考文献

[1] Negri M, Ciezki H K. Combustion of Gelled Propellants Containing Microsized and Nanosized Aluminum Particles [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2015, 31(1): 400-407.

[2] 夏盛勇, 胡春波. 液态铝和三氧化二铝物性参数计算方法综述[J]. 推进技术, 2019, 40(5): 7-15. (XIA Sheng-yong, HU Chun-bo. Review of Physical Property Calculations of Liquid Aluminum and Alumina[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(5): 7-15.)

[3] 江 治, 李疏芬, 赵凤起, 等. 纳米铝粉和镍粉对复合推进剂燃烧性能的影响[J]. 推进技术, 2004, 25(4): 368-372. (JIANG Zhi, LI Shu-fen, ZHAO Feng-qi, et al. Effect of Nano Aluminum and Nickel Powders on the Combustion Properties of Composite Propellant [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(4): 368-372.)

[4] Lynch P, Fiore G, Krier H, et al. Gas-Phase Reaction in Nano Aluminum Combustion[J]. *Combustion Science and Technology*, 2010, 182(7): 842-857.

[5] 孔成栋. 金属铝纳米颗粒燃烧机理及动力学研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.

[6] Bazyn T, Krier H, Glumac N. Shock Tube Measurements of Combustion of Nano-Aluminum [C]. *Reno: 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2006.

[7] Mordosky J, Zhang B, Kuo K, et al. Spray Combustion of Gelled RP-1 Propellants Containing Nano-Sized Aluminum Particles in Rocket Engine Conditions[C]. *Salt Lake City: 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2001.

[8] 邵 昂, 朱韶华, 鄂秀天凤, 等. 含铝金属化浆体推进剂火箭发动机燃烧性能试验研究[J]. 推进技术, 2018, 39(7). 1650-1659. (SHAO Ang, ZHU Shao-hua, E Xiu-tian-feng, et al. Experimental Study on Combustion Characteristic of Rocket Engine Based on Slurry Propellant Containing Aluminum Particles [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(7). 1650-1659.)

[9] 刘 毅, 鄂秀天凤, 李智欣, 等. 高能量密度液体燃料的火箭发动机燃烧性能研究[J]. 推进技术, 2019, 40(5): 1169-1176. (LIU Yi, E Xiu-tian-feng, LI Zhi-xin, et al. Study on Combustion Performance of High-Energy-Density Liquid Fuels in Rocket Engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(5): 1169-1176.)

[10] Zhu M, Chen, X, Zhou C S. Numerical Study of Micron-Scale Aluminum Particle Combustion in an Afterburner Using Two-Way Coupling CFD-DEM Approach [J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2020, 105(1): 191-212.

[11] 陈苏杭, 唐 乐, 许志伟, 等. 含铝HTPB固液混合推进燃料燃烧性能研究[J]. 推进技术, 2018, 39(6): 1412-1419. (CHEN Su-hang, TANG Le, XU Zhi-wei, et al. Study on Combustion Performance of HTPB-Based Fuels Containing Aluminum Particles for Hybrid Propellant [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(6): 1412-1419.)

[12] Goroshin S, Higgins A J, Kamel M. Powdered Metals as Fuel for Hypersonic Ramjets[C]. *Salt Lake City: 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2001.

[13] Moore K, Pantoya M L, Son S F. Combustion Behaviors Resulting from Bimodal Aluminum Size Distributions in Thermites[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(1): 181-185.

[14] 张 宁, 史金光, 马晔璇. 冲压增程制导炮弹气动特

性研究[J]. 兵工学报, 2020, 41(3): 460-470.

[15] 胡好生, 蔡文祥, 赵坚行, 等. 回流燃烧室燃烧过程的三维数值模拟[J]. 航空动力学报, 2008, 23(3): 454-459.

[16] 陈 超, 王英红, 张放利. 铝粉粒径对高铝含量富燃料推进剂一次燃烧性能的影响[J]. 固体火箭技术, 2010, 33(6): 670-674.

[17] 赵 银, 田德余, 江 瑜. 含铝复合固体推进剂的燃烧模拟计算[J]. 航空动力学报, 1987, 2(2): 147-152.

[18] 彭灯辉, 王丹丹, 杨 涛, 等. 固体燃料冲压发动机燃烧效率建模与数值分析[J]. 推进技术, 2014, 35(2): 251-256. (PENG Deng-hui, WANG Dan-dan, YANG Tao, et al. Modeling and Numerical Analysis on Combustion Efficiency of Solid Fuel Ramjet[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(2): 251-256.)

[19] Jose A M, Jose H Q. Evaluation of Reduced-Order Kinetic Models for HTPB-Oxygen Combustion Using LES [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 58(11): 358-368.

[20] Krainov A Y, Poryazov V A, Moiseeva K M, et al. Mathematical Combustion Model of Nanoaluminum-Air Suspension [J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2019 (2): 1-17.

[21] Zhu B, Du T, Sun Y. Oxidation Kinetics of Nano-Aluminum in A Carbon Dioxide Environment[J]. *Progress in Reaction Kinetics and Mechanism*, 2016, 41(1): 177-193.

[22] Glorian J, Gallier S, Catoire L. On the Role of Heterogeneous Reactions in Aluminum Combustion[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 168: 378-392.

[23] 李凤生. 固体推进剂技术及纳米材料的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[24] Liu P, Liu J, Wang M. Ignition and Combustion of Nano-Sized Aluminum Particles: A Reactive Molecular Dynamics Study[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 201 (5): 276-289.

[25] Dilip S S, Puneesh P, Vigor Y. A General Theory of Ignition and Combustion of Nano- and Micron-Sized Aluminum Particles[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 169 (6): 94-109.

[26] Sundaram D S, Yang V, Zarko V E. Combustion of Nano Aluminum Particles(Review)[J]. *Combust Explos Shock Waves*, 2015, 51(2): 173-196.

[27] Storozhev V B, Yermakov A N. Combustion of Nano-Sized Aluminum Particles in Steam: Numerical Modeling [J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(11): 4129-4137.

[28] Sun Y, Sun R, Zhu B, et al. Thermal Reaction Mechanisms of Nano- and Micro-Scale Aluminum Powders in Carbon Dioxide at Low Heating Rate[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2016, 124(3): 1727-1734.

[29] 刘平安, 常 浩, 李树声, 等. 含铝复合推进剂分布燃烧数值模拟[J]. 固体火箭技术, 2018, 41(2): 156-161.

[30] 刘平安, 常 浩, 王文超, 等. 含铝复合推进剂燃烧与流动数值模拟[J]. 固体火箭技术, 2017, 40(6): 698-705.

[31] Mohan S, Ermoline A, Dreizin E L. Pyrophoricity of Nano-Sized Aluminum Particles[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2012, 14(2): 293-295.

[32] 李唯暄, 杨海涛, 陈 雄, 等. 旋流与炭黑对聚乙烯固体燃料冲压发动机工作性能的影响[J]. 推进技术, 2020, 41(6): 1296-1304. (LI Wei-xuan, YANG Hai-tao, CHEN Xiong, et al. Effects of Addition of Carbon Black and Swirl Flow on Combustion Performance of Polyethylene Fueled Solid Fuel Ramjet[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(6): 1296-1304.)

[33] Young G, Balar R, Yu K. Combustor Experiments of Reacting Nano-Particle Laden Flows[C]. *San Jose: AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2013.

[34] 谢爱元, 武晓松, 于栋梁. 固体燃料冲压发动机性能预示[J]. 推进技术, 2014, 35(1): 8-14. (XIE Ai-yuan, WU Xiao-song, YU Dong-Liang. Prediction Model of Performance for Solid Fuel Ramjet[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(1): 8-14.)

[35] 范庆梅, 卢文强. 纳米流体热导率和粘度的分子动力学模拟计算[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(2): 268-270.

(编辑:朱立影)