DOI:10.19789/j.1004-9398.2017.06.007

含铝颗粒固体燃料冲压发动机燃烧速率特性分析*

王洪远 唐田田
(烟台南山学院,山东 烟台 265713)

摘 要

采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型、涡耗散燃烧模型,应用 Fluent 软件 UDF 功能,编写含铝颗粒的 HTPB(端羟基聚丁二烯)热解和铝颗粒点火燃烧模型的 UDF 程序,计算含铝固体燃料冲压发动机内两相湍流流动燃烧,研究不同来流条件下,HTPB 中铝颗粒含量和铝颗粒直径对固体燃料冲压发动机平均燃速的影响规律. 计算结果表明,含铝 HTPB 的固体燃料冲压发动机推进剂平均燃速随着来流空气质量流量、来流空气总温的增加而增大,但随着铝颗粒含量的增大先增后减,随着铝颗粒直径的增大而减小;对平均燃速的影响程度由强到弱依次为来流空气质量流量、铝颗粒含量、来流空气总温以及铝颗粒直径,而来流空气总温、铝颗粒含量以及铝颗粒直径三个因素对平均燃速的影响程度接近.

关键词: 固体燃料冲压发动机,HTPB,铝颗粒,燃速,两相流.
中图分类号: V448

0 引 言

在冲压发动机中,固体燃料冲压发动机(solid fuel ramjet,简称 SFRJ)具有比冲高、燃烧稳定性较好、结构简单、成本低、可靠性高、安全性好等优点,其在防空导弹、超声速反舰巡航导弹、空地反辐射导弹、增程炮弹和动能侵彻弹中具有广阔应用前景. 但是,它也存在固体燃料平均燃速影响因素多、燃料与空气掺混不理想导致燃烧效率低、燃料流量调节困难等燃烧组织技术难点.

针对 SFRJ 平均燃速影响因素问题,国内外许多国家相继进行了大量研究. Schulte [1] 对药柱直径 $d_p=60$ mm 和 $d_p=120$ mm 的聚乙烯(PE)药柱进行实验,获得平均燃速与空气质量流率和来流总温的指数次方呈正比,其影响指数分别为 0.26 和 0.4 ~ 0.5; Elands 等 [2] 得到的数值为 0.5 ~ 0.6 和 0.55 ~ 0.65. Netzer 和 Gany [3] 对 $d_p=10$ mm 的 PE 药柱进行实验得到的指数数值分别为 0.9 ~ 1.0 和 0.95; 而 Ferreira 等 [4] 得到的数值均为 0.35 ~ 0.40. 针对 PMMA 燃料,Korting [5] 获得的数值为 0.25 ~ 0.67 和 0.79; Deborah 和 Gany [6] 得到数值为 0.8 和 1.0. 在国内主要采用数值计算方法进行研究,巩伦昆 [7] 对 PE 燃料得到的指数数值分别为 0.67 和 0.95 ~ 1.0,夏强 [8] 对 PMMA 燃料得到的指数为 0.331 和 0.361. 李新田等 [9] 获得 HTPB 平均燃速的影响指数为 0.741 5 和 0.644 5. 上述来流条件对平均影响指数不同主要是由于研究工况不一致导致的.

目前对于端羟基聚丁二烯(hydroxyl-terminated polybutadiene,HTPB)的 SFRJ 平均燃速的研究,主要集中在不含铝颗粒的单相 SFRJ 平均燃速影响因素,很少有研究含铝 SFRJ 的平均燃速影响因素. 因此,有必要对含铝 HTPB 的 SFRJ 开展平均燃速的影响因素研究工作.

本文采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型、涡耗散燃烧模型,应用 Fluent 软件 UDF 功能,编写含铝颗粒的 HTPB 热解计算程序和铝颗粒点火燃烧模型程序,对含铝 SFRJ 进行两相流动与燃烧数值计算,研究在不同来流条件下,HTPB 中铝颗粒含量和铝颗粒直径对 SFRJ 燃速的影响规律,为含铝 SFRJ 燃烧组织技术的应用提供理论参考.

1 物理模型

图 1 为典型 SFRJ 结构简图 [9],固体燃料内径

收稿日期: 2016-12-05
* 山东省高等学校科技计划项目(批准号: J16LJ51).

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ϕ = 45 mm,药柱长度 300 mm. 补燃室长度 100 mm,直径 φ = 61 mm. 冲压喷管长喉径 φ = 20 mm. 燃烧室空气进口直径 ϕ = 15 mm.

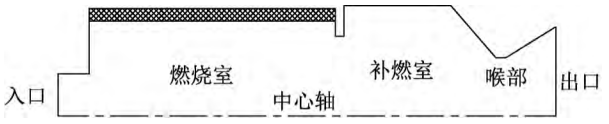


图 1　SFRJ 结构简图

2　计算模型

2.1　基本假设

SFRJ 工作时,其燃烧室内是一个复杂的非定常湍流燃烧和流动过程. 研究结果显示,HTPB 在 SFRJ 燃烧室中的热分解产物众多,反应机理复杂,并随环境条件的变化而变化,但其主要热分解产物为可燃性气体 1-3 丁二烯 C_4H_6. 本文计算采用不同含量的铝颗粒的 HTPB 燃料配方. 为简化计算模型,做出如下合理假设:

1) 热解和燃烧产物均为气相 C_4H_6 和铝颗粒,并且燃面固定不退移;

2) SFRJ 内燃气的流动过程为二维轴对称准定常流动,并且燃烧以湍流扩散燃烧过程处理;

3) 固体燃料内表面为流 - 固耦合传热交界面,而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;

4) 所有气体均为理想气体,符合理想气体状态方程;

5) 忽略重力等彻体力的影响;

6) 各组分的扩散系数相同.

2.2　数值计算方法

2.2.1　气相控制方程

求解雷诺时均 N - S(Navier-Stokes) 方程,为使方程封闭,气相湍流模型选用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型. 该模型不仅保留了标准 $k-\varepsilon$ 模型收敛稳定、精度适当的优点,同时修正了 $k-\varepsilon$ 模型对含有较大压力梯度或旋涡的复杂流场计算结果与实际偏差较大的缺点,能够准确模拟补燃室流动作用.

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+ G_k-\rho\varepsilon-Y_M+S_k\\ \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+ \rho C_1 S_\varepsilon-\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\nu\varepsilon}}+S_\varepsilon\end{aligned}. \quad (1)$$

2.2.2　化学反应模型

HTPB 热解气体与氧气的化学反应机理采用两步不可逆反应[9],化学反应式为:

$$\begin{aligned}C_4H_6+3.5O_2 &\rightarrow 4CO+3H_2O\\ CO+0.5O_2 &\rightarrow CO_2\end{aligned}. \quad (2)$$

铝颗粒蒸发、燃烧化学反应式[10]为:

$$\begin{aligned}AL(l) &\rightarrow AL(g)\\ 4AL(g)+3O_2 &\rightarrow 2AL_2O_3(l)\end{aligned}, \quad (3)$$

其中"l"表示液体状态,"g"表示气体状态.

化学反应速率模型采用 EDM(eddy dissipation model,涡耗散模型),反应中 r 组分 i 的反应速度为:

$$R_{i,r}=v'_{i,r}M_iA\rho\frac{\varepsilon}{k}\min\left[\min_R\left(\frac{Y_R}{v'_{i,r}M_R}\right),B\frac{\sum_P Y_p}{\sum_j^N v''_{j,r}M_j}\right], \quad (4)$$

式中 A,B 为经验常数,计算时,A 取 4.0,B 取 0.5.

2.2.3　铝颗粒运动与燃烧模型

颗粒运动方程为:

$$\frac{du_p}{dt}=F_D(u-u_p). \quad (5)$$

颗粒所受阻力为:

$$F_D=\frac{18\mu}{\rho_p d_p^2}\frac{C_{Dp}Re_p}{24}. \quad (6)$$

颗粒雷诺数为:

$$Re_p=\frac{\rho d_p|u_p-u|}{\mu}. \quad (7)$$

颗粒阻力系数为:

$$C_{Dp}=\begin{cases}\dfrac{24}{Re_p}(1+1/6Re_p^{2/3}) & Re_p\leqslant 1\,000\\ 0.44 & Re_p>1\,000\end{cases}. \quad (8)$$

当颗粒温度小于或等于三氧化二铝熔点温度 2 323 K 时,进行点火过程,铝颗粒温度逐渐增大,颗粒温度满足微分方程:

$$m_pc_p\frac{dT_p}{dt}=A_p[h(T_\infty-T_p)+\sigma(T^4-T_p^4)],$$

$$h=\frac{2k_\infty NuT^{0.8}}{d_p}=\frac{2k_\infty(2.0+0.6Re_p^2Pr^{1/3})T^{0.8}}{d_p}. \quad (9)$$

当铝颗粒温度超过三氧化二铝熔点温度 2 323 K 时铝颗粒开始燃烧,颗粒直径小于 10 μm 时,采用动力学燃烧机制; 而当颗粒直径大于或等于 10 μm 时采用扩散燃烧机制,燃烧时间为:

$$t_b=\begin{cases}0.007\,5d_p^{1.5}/k & d_p\leqslant 10\ \mu m\\ d_p^{0.3}/k & d_p>10\ \mu m\end{cases}, \quad (10)$$

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$k = \begin{cases} 5.5 \times 10^4 \exp(-8\,852/T_p) X_{eff} p^{0.1} T^{0.2} & d_p \leqslant 10\ \mu m \\ X_{eff} p^{0.1} T^{0.2} & d_p > 10\ \mu m \end{cases}, \quad (11)$$

其中氧化剂摩尔分数为:

$$X_{eff} = X_{O_2} + 0.6X_{H_2O} + 0.22X_{CO_2}. \quad (12)$$

2.3 HTPB(含铝)燃速模型

根据假设,含铝金属添加剂的 HTPB 固体燃料热解成分包括纯气项 C_4H_6 和金属颗粒铝. 其燃速采用阿累尼乌斯公式进行确定[10]:

$$\dot{r} = Ae^{-\frac{E}{RT_w}}, \quad (13)$$

其中,$\dot{r}$ 为燃速,单位 m/s,A 为指前因子,E 为活化能,R 为通用气体常数,T_w 为燃料壁面温度.

HTPB 主要物性参数及热解气体特性[10] 如表 1 所示.

表 1 HTPB 的主要参数

参数	数值
密度 ρ_s/(kg/m^3)	1 260
指前因子 A/(m/s),$T_w \leqslant 722$ K	3.964 0
指前因子 A/(m/s),$T_w > 722$ K	0.011 04
活化能 E/(J/mol),$T_w \leqslant 722$ K	55 803.0
活化能 E/(J/mol),$T_w > 722$ K	20 523.8

固体燃料壁面产生的质量源项包括:热解气体 C_4H_6 和铝颗粒的质量源项,分别为:

$$\begin{aligned} S_{m,C_4H_6} &= (1-\beta)\rho_s \dot{r} \pi / L \\ S_{m,Al} &= \beta \rho_s \dot{r} \pi / L \end{aligned}, \quad (14)$$

S_{m,C_4H_6}、$S_{m,Al}$ 分别为固体燃料壁面产生的热解气体 C_4H_6 和铝颗粒的质量源项,ρ_s 为固体燃料密度,为 $\rho_s = 1\,260$ kg/m^3,L 为固体燃料长度,β 为 HTPB 中铝颗粒含量.

固体燃料壁面产生的动量源项为:

$$\begin{aligned} S_{v,C_4H_6} &= -v_{r,C_4H_6} S_{m,C_4H_6} \\ S_{v,Al} &= -v_{r,Al} S_{m,Al} \end{aligned}, \quad (15)$$

S_{v,C_4H_6}、$S_{v,Al}$ 分别为固体燃料壁面产生的热解气体 C_4H_6 和铝颗粒的动量源项,v_{r,C_4H_6}、$v_{r,Al}$ 分别为固体燃料壁面产生的热解气体 C_4H_6 和铝颗粒的径向速度.

固体燃料壁面产生的能量源项为:

$$\begin{aligned} S_{e,C_4H_6} &= -L_v S_{m,C_4H_6} \\ S_{e,Al} &= -L_v S_{m,Al} \end{aligned}, \quad (16)$$

S_{e,C_4H_6}、$S_{e,Al}$ 分别为固体燃料壁面产生的热解气体 C_4H_6 和铝颗粒的能量源项,L_v 为 HTPB 有效汽化热,$L_v = 3 \times 10^6$ J/kg.

2.4 边界条件

由于发动机具有二维轴对称性,因此采用了二维轴对称方法进行数值模拟. 边界条件的设置方法为:固体燃料壁面为质量、动量、能量源项以及铝颗粒添加壁面,使用 UDF 程序进行添加;空气入口设置质量流量入口边界条件,方向垂直于边界,根据计算工况设置空气质量流量和总温;喷管出口为压力出口,压力为 1 atm;其它计算域壁面设置无滑移壁面边界条件,不考虑壁面热损失;对称轴设置轴对称边界条件,各物理量在轴线处沿垂直方向的梯度为零.

2.5 数值计算方法可靠性验证

Campbell 等[11] 采用 HTPB 作为固体燃料进行了三发直流条件下的直连式试验,为了检验燃速的数值计算模型,对此三发试验条件下的燃速进行了数值计算,并与试验结果进行了对比,见表 2 所示,从表中可以看出,数值计算与试验结果的相对误差最大为 7.61%,说明数值计算结果精度满足工程要求,所采用的数值计算方法可靠.

表 2 试验与数值计算结果对比

序号	入口直径/mm	装药长度/mm	空气流量/(kg/s)	空气总温/K	压强/MPa	实验燃速/(mm/s)	计算燃速/(mm/s)	相对误差/%
1	28.6	355	0.603	659	0.738	0.655	0.701	7.01
2	23.4	202	0.293	624	0.807	0.574	0.536	6.70
3	23.4	202	0.308	615	0.848	0.597	0.552	7.61

3 计算结果及分析

影响 SFRJ 燃速的因素主要包括 4 个:即来流空气质量流量 A、来流总温 B、颗粒含量 C 和颗粒直径 D. 如果采用全因素试验,每个因素选用 5 个水平,则需要计算 625 个工况,计算量较大,为了使计算量减小,采用正交试验设计,选用正交表 $L_{25}(5^6)$,选择前 4 列分别为来流空气流量、来流总温、颗粒含量和颗粒直径,后两列为空,每个因素取 5 水平值. 选取空气质量流量 $\dot{m}_a = 0.1 \sim 0.3$ kg/s,总温 $T_a^* = 400 \sim 600$ K,HTPB 中铝颗粒含量 $\beta = 10\% \sim 50\%$,铝颗粒直径 $d_p = 10 \sim 50$ μm 进行数值计算. 表 3 为正交试验影响因素,表 4 为正交试验数值计算结果.

表 3 正交试验影响因素

影响因素	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4	水平 5
来流质量流量 A/(kg/s)	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
来流总温 B/K	400	450	500	550	600
铝颗粒含量 C/%	10	20	30	40	50
铝颗粒直径 D/μm	10	20	30	40	50

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 4　正交试验数值计算结果

试验编号	因素				平均燃速/(mm/s)
	A	*B*	*C*	*D*	
1	1	1	1	1	0.492 2
2	1	2	2	2	0.550 6
3	1	3	3	3	0.614 4
4	1	4	4	4	0.910 2
5	1	5	5	5	0.775 4
6	2	1	2	3	0.687 8
7	2	2	3	4	0.770 5
8	2	3	4	5	0.864 3
9	2	4	5	1	0.886 8
10	2	5	1	2	1.025 5
11	3	1	3	5	0.882 5
12	3	2	4	1	1.484 6
13	3	3	5	2	1.331 0
14	3	4	1	3	0.941 3
15	3	5	2	4	1.042 7
16	4	1	4	2	1.177 6
17	4	2	5	3	1.334 2
18	4	3	1	4	1.035 3
19	4	4	2	5	1.142 2
20	4	5	3	1	1.620 7
21	5	1	5	4	1.433 5
22	5	2	1	5	1.103 6
23	5	3	2	1	1.386 0
24	5	4	3	2	1.457 6
25	5	5	4	3	1.566 5

3.1　流场特性分析

不同来流空气条件下的典型温度分布及氧气质量分数分布图如图 2 和图 3 所示. 由图 3 可知，氧气主要集中分布在燃烧室通道的中心区域，火焰层在通道中心的富氧区与固体燃料壁面之间形成. 因此，从图 2 中可以看到，火焰层所在的区域是高温区，随着来流质量流量的增大，铝颗粒的含量增加以及铝颗粒直径的增大，燃烧室内的温度也逐渐增大，燃烧室内温度的增大，加强了燃烧室内高温气体与固体推进剂壁面的传热，从而导致固体燃料的燃速增大，最终形成平均燃速的增大. 跨过火焰层，在固体燃料壁面附近，氧气质量分数急剧降低，随着轴向距离的增加，氧气质量分数也不断减小. 由于来流质量流量增大，在燃烧室与补燃室中线轴线附近处于富氧区的氧气组分也增大，但是增大到一定程度后又减小.

不同来流空气条件下的铝颗粒轨迹分布如图 4 所示. 由图 4(a) 可知，铝颗粒在来流质量流量、总温、颗粒含量，颗粒直径都较小时，大部分颗粒在燃烧室内与壁面发生碰撞并形成旋流，这种旋转运动增加了颗粒在燃烧室内中心轴线处高温富氧区的停留时间，有利于颗粒在燃烧室内的燃烧. 由图 4(b)～图 4(e) 可知，随着颗粒含量与颗粒直径的增大，颗粒与壁面的碰撞作用减弱，旋转作用也减弱，旋转作用主要集中在燃烧室头部与进入补燃室的出口处. 碰撞与旋流作用的减弱缩短了颗粒在燃烧室内的停留时间，不利于颗粒燃烧，因此造成在燃烧室内颗粒燃烧效果很差，但是进入补燃室后有所改善.

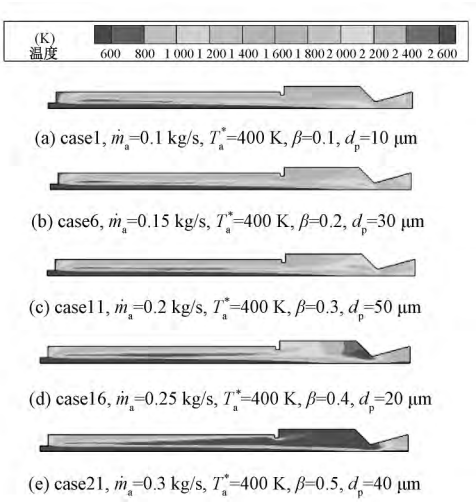


图 2　不同来流空气条件下的温度分布

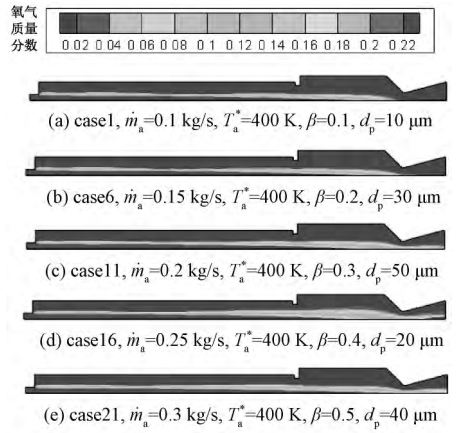


图 3　不同来流空气条件下的氧气组分分布

3.2　平均燃速影响规律

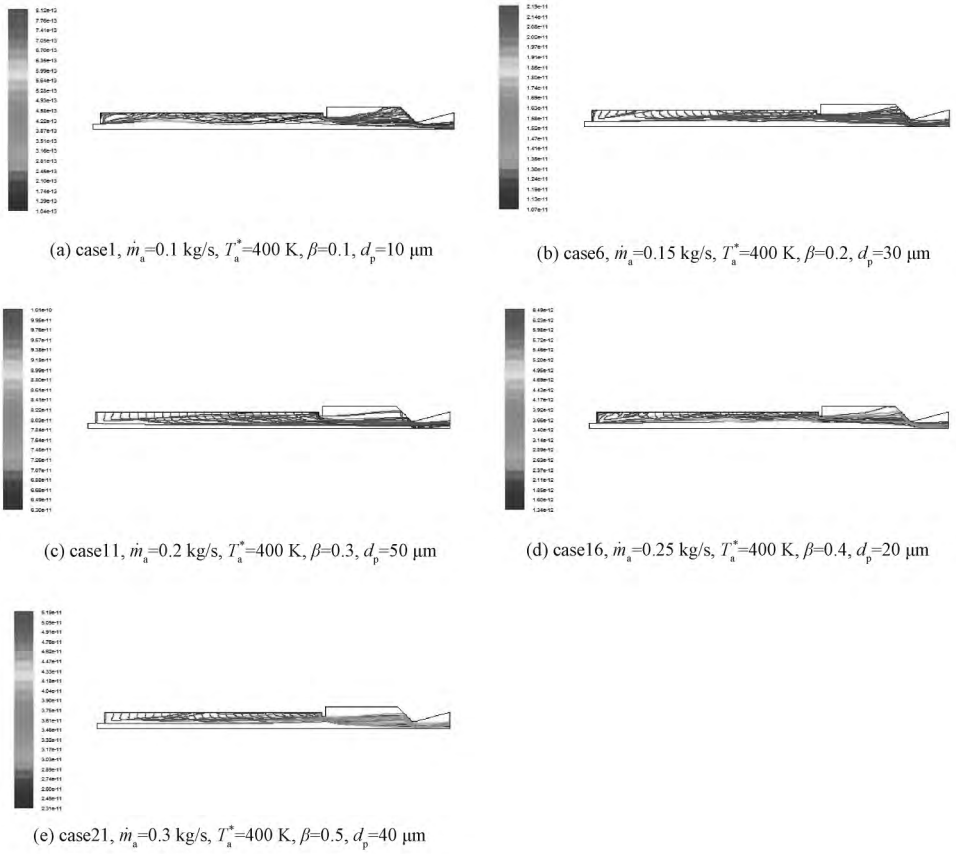
在正交试验分析中，衡量因素影响大小采用的是极差对比的方法，极差:

$$R_j = \max(\overline{K}_{ij}) - \min(\overline{K}_{ij}), \tag{17}$$

$$\overline{K}_{ij} = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3} K_{ij}, \tag{18}$$

其中，K_{ij} 为第 j 列因素 i 水平对应的试验值的和，$\overline{K}_{ij}$ 为其平均值. 由 $\overline{K}_{ij}$ 的大小反应了其对应因素对试验指标的影响. 可以判断 j 因素的最优水平和各因素的优水平组合，即最优组合. 图 5 为各个因素不同

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) case1, $\dot{m}_a$=0.1 kg/s, T_a^*=400 K, β=0.1, d_p=10 μm

(b) case6, $\dot{m}_a$=0.15 kg/s, T_a^*=400 K, β=0.2, d_p=30 μm

(c) case11, $\dot{m}_a$=0.2 kg/s, T_a^*=400 K, β=0.3, d_p=50 μm

(d) case16, $\dot{m}_a$=0.25 kg/s, T_a^*=400 K, β=0.4, d_p=20 μm

(e) case21, $\dot{m}_a$=0.3 kg/s, T_a^*=400 K, β=0.5, d_p=40 μm

图 4　不同来流空气条件下的铝颗粒轨迹分布

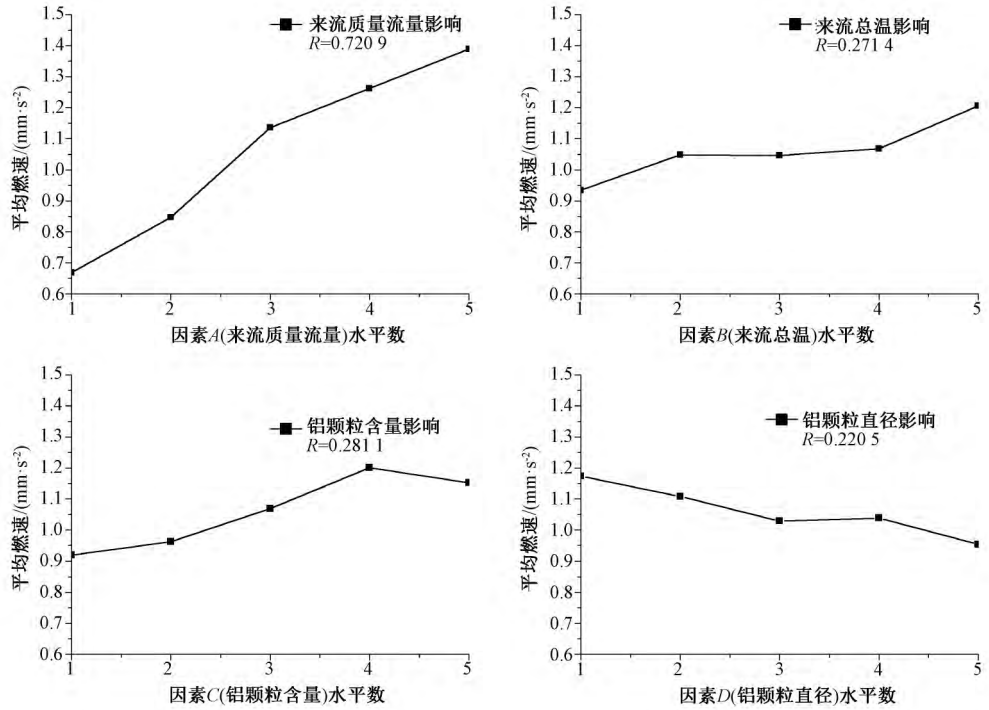


图 5　各个因素及其水平对平均燃速影响

水平值对应的平均燃速 $\overline{K}_{ij}$ 值，即各因素对平均燃速　　的影响图. $\max(\overline{K}_{ij})$ 对应图 2 中平均燃速的最大值;

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$\min(KV_{ij})$ 对应图 2 中平均燃速的最小值.

通过极差分析可以决定质量流量、来流总温、铝颗粒含量与铝颗粒直径四个因素对平均燃速的影响大小,极差越大说明该因素在试验范围内的变化会导致平均燃速结果影响也就越大. 从图 2 中可以看出,随着质量流量、来流总温的增大,平均燃速增大,但是平均燃速随着铝颗粒含量的增大呈现先增大后减小的趋势,而随着铝颗粒直径的增大而逐渐减小. 根据极差分析,来流质量流量对平均燃速的极差明显大于来流总温、铝颗粒含量与铝颗粒直径的极差,而来流总温、铝颗粒含量与铝颗粒直径三个因素产生的极差比较接近,铝颗粒含量极差略大于来流总温极差,来流总温极差略大于铝颗粒直径极差. 所以,影响固体燃料冲压发动机平均燃速的主要因素由强到弱依次为: A(来流质量流量) 、C(铝颗粒含量) 、B(来流总温) 、D(铝颗粒直径) .

铝颗粒加入到固体燃料冲压发动机的目的是提高发动机推进剂的平均燃速,所以取各个因素所对应的平均燃速最大时的水平数为最优水平. 根据上述极差分析以及四个因素对平均燃速的影响规律,可以得到最优水平组合为: $A5B5C4D1$,即当来流质量流量取最大值 0.3 kg/s、来流总温取最大值 600 K,铝颗粒含量取 40% 和铝颗粒直径取为 10 μm 时得到的平均燃速值最大.

4　结　论

本文建立了考虑化学反应及燃速计算的含铝 HTPT 固体燃料冲压发动机流场数值仿真模型. 针对典型的发动机结构,在不同空气来流条件下仿真获得了发动机燃速分布. 主要结论如下:

(1) 含铝 HTPB 的固体燃料冲压发动机推进剂平均燃速随着空气质量流量、空气总温的增大而增大,但是随着铝颗粒含量的增大呈现先增后减的规律,随着铝颗粒直径的增大而减小;

(2) 空气质量流量、空气总温、铝颗粒含量以及铝颗粒直径四个因素对平均燃速的影响程度不一致,空气质量流量影响程度最大、其次是铝颗粒含量、然后是空气总温,最弱的是铝颗粒直径. 但空气总温、铝颗粒含量以及铝颗粒直径三个因素对平均燃速的影响程度接近.

(3) 为获得最大的平均燃速,最优水平组合为: $A5B5C4D1$,即当来流质量流量取最大值 0.3 kg/s、来流总温取最大值 600 K,铝颗粒含量取 40% 和铝颗粒直径取为 10 μm 时得到的平均燃速值最大.

参　考　文　献

[1] Schulte G. Fuel regression and flame stabilization studies of solid-fuel ramjets [J]. Journal of Propulsion and Power, 1986, 2(4): 301 – 304.

[2] Elands P J M, Dijkstra F, Korting P A O G, et al. Comparision of combustion experiments and theory in polyethylene solid fuel ramjets [J]. Journal of Propulsion and Power, 1990, 6(6): 732 – 739.

[3] Netzer A, Gany A. Burning and flame holding characteristics of a miniature solid fuel ramjet combustor [J]. Journal of Propulsion and Power, 1991, 7(3): 357 – 363.

[4] Ferreira J G, Carvalho J A, Silva M G. Experimental investigation of polyethylene combustion in a solid fuel ramjet [C]. Lake Buena Vista, FL, USA: AIAA, 1996: 2698.

[5] Korting P A O G, Van Der Geld C W M, Vos J B, et al. Combustion of PMMA in a solid fuel ramjet [C]. Huntsville, AL, USA: AIAA, 1986: 1401.

[6] Pelosi-Pinhas D, Gany A. Bypass-regulated solid fuel ramjet combustor in variable flight conditions [J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(1): 73 – 80.

[7] 巩伦昆,陈雄,周长省,等. 结构尺寸对固体燃料冲压发动机燃速影响的仿真研究 [J]. 兵工学报, 2016, 37(5): 798 – 807.

[8] 夏强. 固体燃料冲压发动机工作过程研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2011.

[9] 李新田,卢鑫,李延成,等. HTPB 固体燃料冲压发动机流场仿真与燃速分析 [J]. 航空动力学报, 2016, 31(6): 1504 – 1510.

[10] Sun X L, Tian H, Yu N J, et al. Regression rate and combustion performance investigation of aluminum metallized HTPB/98HP hybrid rocket motor with numerical simulation [J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 42: 287 – 296.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[11] Campbell Jr W H,Ko B N,Lowe S R. Solid-fuel ramjet fuel regression rate/thrust modulation [J]. Journal of Propulsion and Power,1992,8(3):624 - 629.

Fuel Regression Rate Analysis of Aluminum Solid Fuel Ramjet

Wang Hongyuan Tang Tiantian

(Yantai Nanshan University,Yantai Shandong 265713)

Abstract

Two-phase flow and combustion in HTPB(hydroxyl terminated polybutadiene) solid fuel ramjet with aluminum particles is numerically simulated by means of Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model,eddy-dissipation combustion model. With different flow conditions,the influence of aluminum particle content and aluminum particle diameter in HTPB on the law of average fuel regression rate was analyzed by the UDF function of Fluent software. The results show that the average burning rate of the solid fuel ramjet propellant with aluminum-containing HTPB increases with the increase of the air mass flow rate and the total air temperature,but it increases firstly and then decreases with the increase of aluminum particle content,and it decreases with the increase of aluminum particle diameter. The influence on the average burning rate from strong to weak is the air mass flow rate,the aluminum particle content,the total air temperature and the diameter of aluminum particle. However,the influence of total air temperature,aluminum particle content and aluminum particle diameter on the average burning rate is similar.

Key words: solid fuel ramjet, HTPB, aluminum particle, average fuel regression rate, two-phase flow.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net