

烃类燃料的能量特性

袁在顺

(航空航天部101研究所)

摘要: 本文对烃类燃料的能量特性进行了分析比较。三种烃 (CH_4 、 C_3H_8 、RP-1) 分别同液态氧组合, 其中含氢较高的 CH_4 具有最高的比冲和较低的燃烧室温度, 其燃烧产物中固炭量低于 C_3H_8 与RP-1。三种烃分别同液态氧组合的比冲均高于 $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 与 $\text{N}_2\text{O}_4/(\text{CH}_3)_2\text{NNH}_2$ 。本文还指出了烃同液氧组合比冲随 α 与 p_c 变化的关系。最后, 对烃类燃料性能改进问题进行了论述。结果表明, 将一定量的液氢加入烃中混合燃烧可提高比冲, 减少低 α 条件下燃烧产物中固炭量。另一方面, 通过加液氢还可使燃气发生器工质的 $R_c T_c$ 值提高。

关键词: 烃类燃料, 热特性, 性能分析

THE PERFORMANCES OF HYDROCARBON FUELS

Yuan Zaishun

(The 101st Research Institute)

Abstract: The thermodynamic performance of hydrocarbon fuels are analysed and compared with each other in this paper. In the comparison of hydrocarbons (CH_4 , C_3H_8 and RP-1), it is shown that higher hydrogen content of O_2/CH_4 combination leads to the highest specific impulses of hydrocarbon propellants based on oxygen. The T_c (combustion chamber temperature) value and solid carbon in the combustion products for O_2/CH_4 combination are lower than those for $\text{O}_2/\text{C}_3\text{H}_8$ and $\text{O}_2/\text{RP-1}$. The I_s values for hydrocarbon propellants combined with oxygen are also higher than that for $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ as well as $\text{N}_2\text{O}_4/(\text{CH}_3)_2\text{NNH}_2$. The variation of I_s with oxidizer/fuel ratio and combustion chamber pressure for hydrocarbon fuels combined with oxygen is also presented in this paper.

Finally, further improvement work is presented and studied. It is shown that adding liquid hydrogen is available to increase the specific impulses for hydrocarbon- O_2 systems and to reduce solid carbon in combustion products at lower oxidizer/fuel ratio. On the other hand, the higher $R_c T_c$ value of gaseous working

fluid of generator can be obtained by the addition of liquid hydrogen.

Keywords: Hydrocarbon fuel, Thermal property, Performance analysis

符 号 表

α 余氧系数	p_c 燃烧室压力
p_e 喷口压力	T_c 燃烧室温度
I_s 设计状态比冲	I_u 真空比冲
C_s 燃烧产物中固态炭	μ_c 燃烧产物平均分子量
R_c 燃气气体常数	

一、引 言

烃类燃料 (CH_4 、 C_3H_8 、RP-1) 具有价廉、毒性小的优点。当它们与液态氧组合时具有较高比冲, 适用于航天运载器发动机。本文对烃类燃料与液态氧组合的主要热力学性能进行分析讨论, 重点论述三烃及其双燃料与液氧组合各自的比冲变化规律, 以及三烃之间能量特性差别与性能改进等问题。对其它性能如低 α 条件下固态炭与 R_c 、 T_c 值等亦作了简述。文中引用了另外两种供比较的推进剂数据。文中比冲均系冻结流计算值。

二、烃类与其它燃料能量特性比较

烃类燃料具有较好的使用性能。因此, 对其能量特性进行评价, 以便选出较优品种作为航天运载器的燃料是有意义的。理论计算表明, 烃类燃料同液态氧组合其能量较高。为了比较, 表1列出五种推进剂的主要热力性能参数。

表1 最佳 α 条件下的理论性能

推 进 剂	α	$T_c(\text{K})$	$I_s(\text{m/s})$	$I_v(\text{m/s})$	μ_c
O_2/CH_4	0.75	3487	3441.1	3534.4	20.44
$\text{O}_2/\text{C}_3\text{H}_8$	0.73	3552	3370.5	3459.8	21.34
$\text{O}_2/\text{RP-1}$	0.73	3601	3298.1	3385.2	22.51
$\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	0.78	3387	3218.3	3308.9	23.13
$\text{N}_2\text{O}_4/(\text{CH}_3)_2\text{NNH}_2$	0.75	3368	3149.9	3229.3	22.66

$$p_c = 7.85\text{MPa}, p_e = 3.43 \times 10^{-3}\text{MPa}$$

表1中的数据表明, 三种烃的燃烧温度均高于 $\text{N}_2\text{O}_4/(\text{CH}_3)_2\text{NNH}_2$ 与 $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 。而燃烧产物平均分子量则低于后二者, 因而三烃的比冲均高于表中其它二种推进剂。

五种推进剂比冲高低次序为: $\text{O}_2/\text{CH}_4 > \text{O}_2/\text{C}_3\text{H}_8 > \text{O}_2/\text{RP-1} > \text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} > \text{N}_2\text{O}_4/(\text{CH}_3)_2\text{NNH}_2$ 。以上分析说明, 烃类燃料比冲优势较突出, 加上其资源丰富与毒性小等优点, 使其成为航天运载器所需推进剂中较理想的组合。

三、烃类燃料能量特性随 α 的变化

根据最佳 α 条件下对比五种推进剂能量特性指出, CH_4 具有最高比冲, 但其优势随着 α 的变化而改变。理论计算结果说明, 三种烃与液氧组合的能量特性之差随着余氧系数增高而呈现明显变化。例如图1中 O_2/CH_4 与 $\text{O}_2/\text{C}_3\text{H}_8$ 的 $I_s \sim \alpha$ 曲线在较低 α 范围(0.5附近)较接近, 当 α 大于0.5时曲线间距离拉开, 即随着 α 的提高其性能差扩大。主要原因是由于随着 α 的提

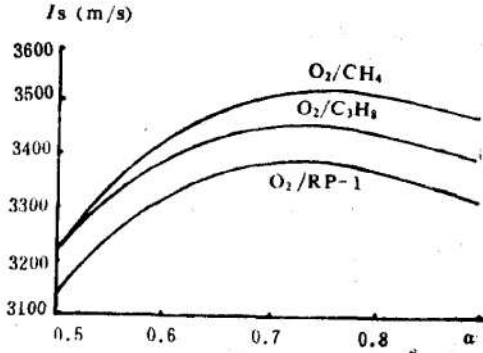


图1 烃氧推进剂比冲与 α 关系
($p_c = 14.71\text{MPa}$, $p_e = 3.43 \times 10^{-3}\text{MPa}$)

高, 氧化反应更充分, 反应产物中 H_2O 与 CO_2 含量均有所增加, 但其中H/C较高的 CH_4 燃烧产物中 H_2O 增量多于 C_3H_8 , 而 CO_2 增量则少于 C_3H_8 。其中 H_2O 的单位质量焓值低于 CO_2 , 有利于 T_c/μ_c 的提高。此外, 随着 α 的上升, CH_4 燃烧产物中吸热性的 H_2 分子含量比 C_3H_8 燃烧产物中的 H_2 分子含量下降快些, 故随着 α 的上升, 燃烧产物变化对比冲的影响更有利于 O_2/CH_4 。这说明随着 α 的上升, CH_4 较 C_3H_8 与RP-1的能量特性优势更显著。

由图1还可看到, $\alpha = 0.60 \sim 0.75$ 之间, O_2/CH_4 组合的比冲对 α 变化的敏感性略强于 $\text{O}_2/\text{C}_3\text{H}_8$ 与 $\text{O}_2/\text{RP-1}$ 。计算表明, $p_c = 17.66\text{MPa}$, $p_e = 3.43 \times 10^{-3}\text{MPa}$ 时, 由于混合比偏差(± 0.05)引起的比冲变化对 O_2/CH_4 、 $\text{O}_2/\text{C}_3\text{H}_8$ 、 $\text{O}_2/\text{RP-1}$ 分别为5.2、1.6与1.2m/s, 因而实用中若对应的余氧系数处于0.60~0.75之间则 O_2/CH_4 对混合比偏差的控制要求更严于 $\text{O}_2/\text{C}_3\text{H}_8$ 与 $\text{O}_2/\text{RP-1}$ 。

四、燃烧室压力对比冲的影响

当今航天运载器动力系统中所用发动机力争采用高燃烧室压力, 以提高发动机燃烧效率, 但不同的推进剂应考虑采用不同的室压。其中依据之一是比冲值 p_c 的变化规律。表2列出了 $\alpha = 0.70$, $p_e = 3.43 \times 10^{-3}\text{MPa}$ 条件下烃氧推进剂与 $\text{N}_2\text{O}_4/(\text{CH}_3)_2\text{NNH}_2$ 真空比冲随 p_c 变化的理论计算值。由表2数据可知道每增加1MPa室压对应的比冲增值分布情况。其中烃氧组

表2 真空比冲(m/s)与室压(MPa)的关系
($\alpha = 0.70$, $p_e = 3.43 \times 10^{-3}\text{MPa}$)

推进剂 \ 室压 真空比冲	6.87	11.77	17.66	22.56	29.43
O_2/CH_4	3515.7	3574.9	3614.7	3638.8	3661.8
$\text{O}_2/\text{C}_3\text{H}_8$	3443.1	3506.9	3550.9	3576.2	3603.9
$\text{O}_2/\text{RP-1}$	3368.6	3431.9	3477.4	3502.6	3529.4
$\text{N}_2\text{O}_4/(\text{CH}_3)_2\text{NNH}_2$	3214.6	3263.0	3295.0	3313.7	3332.3

合的比冲增值相近。 $N_2O_4/(CH_3)_2NNH_2$ 对应的比冲增值小于三烃。说明烃氧推进剂用于高压发动机较 $N_2O_4/(CH_3)_2NNH_2$ 有利。表2数据表明,当室压超过17.66MPa时各推进剂比冲增值渐小。

五、烃类燃料性能的改进

提高烃类燃料的H/C比值是获取较高比冲的重要途径,通常外加一定量的液氢与烃组成双燃料,这种双燃料由于氢含量增加,使其燃烧产物(以液态氧为氧化剂)平均分子量显著下降,因而比冲相应提高。表3给出了三种双燃料与纯烃比冲的对比值,可看出加氢的效果是显著的。例如 CH_4 中加入10% H_2 真空比冲提高4.6%;RP-1中加入10% H_2 其真空比冲提高6.1%。但随着加氢量的增多,比冲的提高趋势逐渐变小。例如 O_2/C_3H_8 与 $O_2/C_3H_8 + 10\%H_2$ 之真空比冲差为186.4m/s,而 $O_2/C_3H_8 + 20\%H_2$ 与 $O_2/C_3H_8 + 30\%H_2$ 之真空比冲差只有127.5m/s。此外,计算结果指出,外加氢的效益随着 α 的上升而下降。表4的数据表明, $\alpha = 0.40$ 时, $O_2/CH_4 + 10\%H_2$ 的比冲较 O_2/CH_4 高10.8%, $\alpha = 0.60$ 时仅高5.6%。 C_3H_8 与RP-1的加氢效益亦类似。这是因为较低 α 时加入的 H_2 大部分以气态 H_2 存在于反应混合物中,但随着 α 的提高,加入的 H_2 被氧化成 H_2O 分子,使燃气平均分子量升高,在一定程度上抑制了比冲的上升趋势。

表3 双燃料与纯烃的理论性能
($\alpha = 0.70$; $p_c = 11.77MPa$ $p_e = 3.43 \times 10^{-3}MPa$)

推 进 剂	$T_c(K)$	$I_g(m/s)$	$I_v(m/s)$	μ_c
O_2/CH_4	3430	3492.1	3574.5	19.78
$O_2/CH_4 + 10\%H_2$	3442	3651.0	3737.3	18.18
$O_2/CH_4 + 20\%H_2$	3452	3784.4	3873.6	16.98
$O_2/CH_4 + 30\%H_2$	3459	3899.1	3990.3	16.05
O_2/C_3H_8	3599	3425.4	3506.8	21.43
$O_2/C_3H_8 + 10\%H_2$	3568	3607.8	3693.2	19.22
$O_2/C_3H_8 + 20\%H_2$	3547	3756.9	3845.2	17.67
$O_2/C_3H_8 + 30\%H_2$	3532	3881.5	3972.7	16.51
$O_2/RP-1$	3648	3352.9	3432.3	22.61
$O_2/RP-1 + 10\%H_2$	3604	3556.9	3641.2	19.93
$O_2/RP-1 + 20\%H_2$	3573	3720.6	3808.9	18.11
$O_2/RP-1 + 30\%H_2$	3551	3856.9	3947.2	16.80

以上分析表明,用外加氢办法提高比冲时必须根据推进系统的其它性能需要,综合选定适当的加氢量,以便获得最佳效果。

外加氢与烃混合燃烧除提高比冲外还可抑制低 α 条件下燃烧产物中固态炭的生成,使燃

表4 不同 α 条件下烃加氢的效益
($p_c = 14.71\text{MPa}$ $p_e = 3.43 \times 10^{-3}\text{MPa}$)

I_s (m/s) \ α	0.40	0.50	0.60	0.70
推进剂				
O_2/CH_4	2827.3	3266.8	3426.4	3518.6
$\text{O}_2/\text{CH}_4 + 10\%\text{H}_2$	3133.1	3446.8	3616.6	3678.7
$\text{O}_2/\text{C}_3\text{H}_8$	2842.9	3204.8	3393.1	3454.9
$\text{O}_2/\text{C}_3\text{H}_8 + 10\%\text{H}_2$	3165.7	3453.3	3598.6	3637.8
$\text{O}_2/\text{RP-1}$	2748.8	3127.3	3322.5	3382.3
$\text{O}_2/\text{RP-1} + 10\%\text{H}_2$	3104.9	3400.8	3548.6	3586.9

表5 低 α 条件下燃烧产物性能
($p_c = 24.53\text{MPa}$)

推进剂	α	C_s (%)	T_c (K)	$R_c T_c$ (kJ/kg)
O_2/CH_4	0.10	10.4	1057	530.8
O_2/CH_4	0.20	2.4	1306	733.5
$\text{O}_2/\text{CH}_4 + 10\%\text{H}_2$	0.10	0	1139	760.3
$\text{O}_2/\text{CH}_4 + 10\%\text{H}_2$	0.20	0	1354	948.0
$\text{O}_2/\text{C}_3\text{H}_8$	0.10	27.8	1217	536.4
$\text{O}_2/\text{C}_3\text{H}_8$	0.15	20.1	1336	640.1
$\text{O}_2/\text{C}_3\text{H}_8 + 20\%\text{H}_2$	0.05	0	1110	895.2
$\text{O}_2/\text{C}_3\text{H}_8 + 20\%\text{H}_2$	0.10	0	1279	1007.6
$\text{O}_2/\text{RP-1}$	0.10	36.1	1240	473.3
$\text{O}_2/\text{RP-1}$	0.15	26.7	1362	578.3
$\text{O}_2/\text{RP-1}$	0.20	17.4	1457	668.6
$\text{O}_2/\text{RP-1} + 20\%\text{H}_2$	0.10	0	1302	960.7
$\text{O}_2/\text{RP-1} + 20\%\text{H}_2$	0.15	0	1391	1044.1

烧性能得以改善。由表5的数据看到， O_2/CH_4 在 $\alpha = 0.10$ 时燃烧产物中固态炭为10.4%。 $\text{O}_2/\text{CH}_4 + 10\%\text{H}_2$ 在相同 α 条件下固炭量为零，即理论上认为 CH_4 中加入10% H_2 后可消除固态炭。 C_3H_8 与RP-1中各加入20% H_2 后亦可达同样目的。与此同时，烃中加氢可使燃烧产物 $R_c T_c$ 之值显著提高。这种双燃料用于燃气发生器可提高其工作性能。图2给出了 C_3H_8 加氢后燃烧产物的 $R_c T_c$ 值迅速提高的示例。可看到 $R_c T_c$ 以近乎直线关系随加氢量增加而提高。这是由于氢的加入促使 H/C 比值增大，相应地使燃烧产物平均分子量下降的结果。从表5中三烃（未加氢者）性能比较中还可看出，由于 H/C 比值的大小依次为 $\text{CH}_4 > \text{C}_3\text{H}_8 > \text{RP-1}$ ，三者中RP-1含碳量最高，因而在相同 α 与 p_c 条件下，RP-1燃烧产物中固炭量分别为 CH_4 的3.5倍，为 C_3H_8 的1.3倍以上。RP-1在贫氧条件下燃烧时生成固炭的倾向最大，而 $R_c T_c$ 值最小。三烃中 CH_4 的性能最佳，例如 $\alpha = 0.10$ 时其 $R_c T_c$ 值与 C_3H_8 相近，但 CH_4 燃烧产物的温度与固炭量却比 C_3H_8 低很多。至于 CH_4 同RP-1相比则无论固炭量与 $R_c T_c$ 值都更优越。 CH_4 用作燃气发生器工质时，可减少加氢量或不加氢即能满足性能要求（固炭少， $R_c T_c$ 高）。而 C_3H_8 与RP-1用于燃气发生器则必须加较多的氢（约20%）方可适应需要。

六、结 论

1. 烃氧或烃氢氧三组元推进剂比冲值较 $\text{N}_2\text{O}_4/(\text{CH}_3)_2\text{NNH}_2$ 与 $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 高2%以

$R_c T_c$ (kJ/kg)

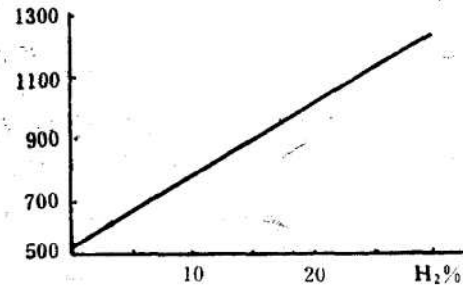


图2 C_3H_8 的 $R_c T_c$ 与外加氢的关系
($p_c = 24.53\text{MPa}$, $\alpha = 0.10$)

加速度对含铝复合推进剂瞬时燃速的影响

张如洲 李葆江 郑晓平 耿青涛

(北京理工大学)

摘要: 本文研究了加速度向量对含铝复合推进剂瞬时燃速的影响。其中包括加速度大小和方向对推进剂瞬时燃速增加率的影响和在同一加速度条件下铝粉粒径、铝粉含量和铝粉形状对瞬时燃速增加率的影响。此外,还对研究结果进行了分析和讨论。

关键词: 含铝推进剂, 燃烧速率, 凝聚, 加速度试验

EFFECT OF ACCELERATION VECTOR ON TRANSIENT BURNING RATE OF ALUMINIZED COMPOSITE SOLID PROPELLANTS

Zhang Ruzhou Li Baojiang Zheng Xiaoping Geng Qingtao

(The Beijing Institute of Technology)

Abstract: In this paper some experimental results of combustion of aluminized composite solid propellants in acceleration fields are described, which includes the effects of acceleration level and direction of acceleration vector on transient burning rate of propellants.

The effects of aluminum particle size, aluminum content and particle shape on transient burning rate of propellants in same acceleration field are also introduced. In addition, the results of study are analyzed and discussed.

Keywords: Aluminized propellant, Burning rate, Agglomeration, Acceleration test

(接上页)

上, 适合用作大推力发动机的主推进剂。

2. 三烃中 O_2/CH_4 具有最高比冲, 且燃烧温度最低, 在贫氧条件下燃烧时产物中固炭量最少。 C_3H_8 的性能略次于 CH_4 但优于RP-1。

3. 外加氢与烃混合燃烧对改进烃类的性能具有明显效果, 既可提高比冲又能降低贫氧燃烧产物中固炭含量, 并提高 $R_c T_c$ 值, 改进燃气发生器性能。但必须注意, 随着加氢量逐渐增加以及 α 的提高, 比冲上升趋势变小, 因此, 外加氢量必须结合其它性能变化选择最佳比例。

本文1990年4月21日收到