

# 基于碳氢燃料裂解工作的 ATR 发动机性能分析

张留欢<sup>1</sup>, 刘 嫵<sup>2</sup>, 张蒙正<sup>1</sup>

(1. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100; 2. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

**摘 要:** 提出了一种基于碳氢燃料裂解气体驱动涡轮工作的 ATR 发动机方案, 并对特定裂解气成分的碳氢 ATR 发动机性能进行计算, 获得了裂解气中烷/烯比对发动机性能的影响规律。结果表明, 在同一飞行条件下, 随着发动机转速上升, 推力逐渐上升, 比冲基本呈减小趋势; 在同一转速下, 碳氢燃料裂解气中烷/烯比越大, 发动机比冲越高。在烷/烯比 4、转速百分比 70% 条件下, 发动机比冲最高达到约 7 644 m/s; 随着烷/烯比逐渐升高, 裂解气比热容逐渐升高。

**关键词:** 碳氢燃料; 裂解; ATR 发动机; 烷/烯比; 发动机性能

**中图分类号:** V439-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2017) 03-0001-05

## Performance analysis of ATR engine working with cracking gas of hydrocarbon fuel

ZHANG Liuhuan<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>2</sup>, ZHANG Mengzheng<sup>1</sup>

(1. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** A new scheme about ATR (air turbo rocket) engine driven by cracking gas of hydrocarbon fuel is presented in this paper. The performance of ATR engine working with specific cracking gas components is calculated. The influence law of alkane/alkene ratio from cracking gas on engine performance was obtained. The results show that the thrust increases and the specific impulse has a degressive trend basically as the rotating speed of the engine increases under the same flight condition, and the higher the alkane/alkene ratio of cracking gas rises, the higher the specific impulse becomes at the same rotating speed. The specific impulse of the engine can reach about 7644 m/s while alkane/alkene ratio is 4 and its rotating speed is 70%. The specific heat capacity of cracking gas increases gradually with the rise of alkane/alkene ratio.

**Keywords:** hydrocarbon fuel; cracking; ATR engine; alkane/alkene ratio; engine performance

收稿日期: 2016-10-21; 修回日期: 2017-02-01

基金项目: 航天支撑技术项目(617010406)

作者简介: 张留欢 (1986—), 男, 工程师, 研究领域为组合推进系统气动热力技术

## 0 引言

空气涡轮火箭发动机作为一种组合循环发动机,将火箭发动机推力室与涡轮喷气发动机进行有机组合<sup>[1-2]</sup>,将涡轮入口气流参数与飞行工况解耦,拓宽了发动机工作高度、速度范围。

根据热力循环方式不同,ATR 发动机主要分为燃气发生器循环和膨胀循环 2 种方案<sup>[3-7]</sup>。燃气发生器循环 ATR 发动机多使用双组元(液氧/液氢、液氧/甲烷、 $\text{H}_2\text{O}_2$ /煤油等)作为推进剂<sup>[8-9]</sup>,这种方式发动机自带氧化剂,且推进剂低温或热稳定性差;膨胀循环 ATR 发动机(Air-Turbo-Ram Expander cycle, ATREX)使用液氢作为推进剂<sup>[10-11]</sup>,其做功能力强,燃烧热值高,但密度低,储存容积大且对材料性能要求高,操作性较差<sup>[12]</sup>。

碳氢燃料在吸气式发动机领域中应用广泛。目前,国内外对于碳氢燃料的研究多集中在吸热型碳氢燃料再生冷却方面<sup>[13-15]</sup>。碳氢燃料通过受热或催化等方式裂解为小分子烷烃、烯烃等气相物,过程吸热,可对发动机壁面进行冷却<sup>[16-21]</sup>。同时,碳氢燃料热稳定性良好,方便使用,从推进剂选择方面有利于 ATR 发动机应用。基于此,本文提出了一种基于碳氢燃料裂解工作的 ATR 发动机(下文简称碳氢 ATR 发动机)方案,详细阐述了该发动机工作原理,并进行了发动机性能计算,研究了碳氢燃料裂解成分对发动机性能的影响规律,可为后续吸气式组合发动机方案研究提供新的思路。

## 1 工作原理及性能

碳氢 ATR 发动机主要包括进气道、压气机、气体发生装置、涡轮、燃烧室、尾喷管及换热装置等组件。碳氢 ATR 发动机的特点主要是其气体发生装置利用碳氢燃料裂解产生小分子烃类气相物的特性。在发动机工作过程中,首先采用单独设计安装的燃气发生器产生高温高压富燃燃气驱动发动机短暂工作,之后高压超临界碳氢燃料进入发动机,通过换热装置实现升温裂解(同时冷却燃烧室壳体),产生的高温高压气相物进入

气体发生装置,直接驱动涡轮带动压气机工作,大气中的空气经压气机增压后直接进入涡轮后的燃烧室,在燃烧室内和经过涡轮做功后的可燃气体进行燃烧,生成的高温燃气通过喷管膨胀产生推力。

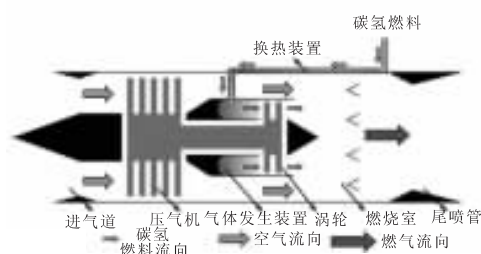


图 1 碳氢 ATR 发动机工作原理示意图

Fig. 1 Sketch for working principle of ATR engine working with cracking of hydrocarbon fuel

根据碳氢 ATR 发动机工作原理,建立了发动机工作平衡方程,具体如下。

1) 涡轮与压气机物理转速平衡:

$$n_c = n_t \quad (1)$$

式中:  $n$  为物理转速;下标  $c$  为压气机;下标  $t$  为涡轮。

2) 发动机流道压力平衡(不考虑气体沿程压力损失):

$$p_2 \pi_c = \frac{p_4}{\pi_t} = p_7 \quad (2)$$

式中:  $p$  为发动机截面气体总压;  $\pi$  为压比;下标 2, 4, 7 分别为压气机入口截面、涡轮入口截面、喷管喉部截面。

3) 气体质量流量平衡:

$$m_7 = m_2 + m_4 \quad (3)$$

式中  $m$  为单位时间通过某截面气体质量流量。

4) 涡轮与压气机功率平衡(不考虑机械功损失):

$$L_c = L_t \quad (4)$$

式中  $L$  为功率。

基于上述基本平衡方程,建立了发动机计算模型,发动机设计点(地面状态 100% 转速百分比)推力约 10 kN,空气流量为 10 kg/s,压气机增压比 2.6,涡轮落压比 16。同时考虑到换热装

置设计难度, 给定碳氢燃料裂解气总温 (涡轮前气体总温) 为 1 000 K。发动机部分组件参数取值如表 1 所示。

表 1 碳氢 ATR 发动机设计点组件参数(部分)

Tab. 1 Parameters of subassembly for ATR engine working with cracking gas of hydrocarbon fuel at designed state

名 称	数 值
压气机流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	10
压气机效率	0.9
压气机增压比	2.6
涡轮落压比	16
涡轮效率	0.8
涡轮前气体总温/K	1 000
燃烧室总压恢复系数	0.98

发动机燃料采用在火箭煤油基础上创新配方的新型吸热碳氢燃料, 经试验研究, 在 1 000 K 高温稳态条件下该碳氢燃料主要裂解气相产物为甲烷、乙烷、丙烷、乙烯、丙烯及丁烯等 (忽略含量较少的碳 4 以上烯烃)。其中, 烷烃类中, 甲烷、乙烷、丙烷质量比为 1.1:1.55:1; 烯烃类中, 乙烯、丙烯、丁烯质量比为 2.1:1.7:1。

基于上述发动机参数, 对典型飞行条件 (0 km/0 Ma, 4 km/0.6 Ma, 8 km/1.5 Ma, 12 km/2 Ma) 碳氢 ATR 发动机性能进行了计算。计算过程中, 假设碳氢燃料裂解完全, 且组分比例不变<sup>[22]</sup>。图 2 给出了烷/烯比 (烷烃与烯烃的质量比) 为 1 时, 不同工况下发动机推力、比冲参数随转速变化结果。图 2 中横坐标为发动机转速百分比。图 2 显示, 在同一飞行条件下, 随着发动机转速上升, 推力逐渐上升, 比冲基本呈减小趋势。其中, 地面条件、70%转速百分比时, 发动机比冲较地面条件其他转速相对较高, 其值约为 6 374 m/s; 12 km/2 Ma 条件、60%转速百分比时, 比冲约为 13 000 m/s。

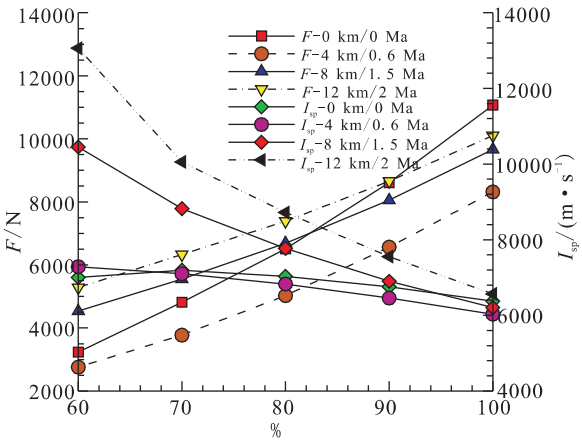


图 2 不同典型点推力、比冲随发动机转速变化结果

Fig. 2 Variation of thrust and specific impulse with rotating speed at typical flight condition

2 烷/烯比影响

研究表明, 通过在碳氢燃料中加入添加剂, 可提高乙烯、丙烯等低碳烯烃的选择性<sup>[23]</sup>。对于吸热型碳氢燃料, 其裂解产物中烷/烯比越低, 吸热能力越强<sup>[24]</sup>。图 4 和图 5 分别给出了基于上述发动机组件参数的碳氢 ATR 发动机, 在地面条件下燃料流量、推力、比冲等随烷/烯比 (0.5, 1, 2, 3, 4) 及转速 (60%, 70%, 80%, 90%, 100%) 等的变化结果。

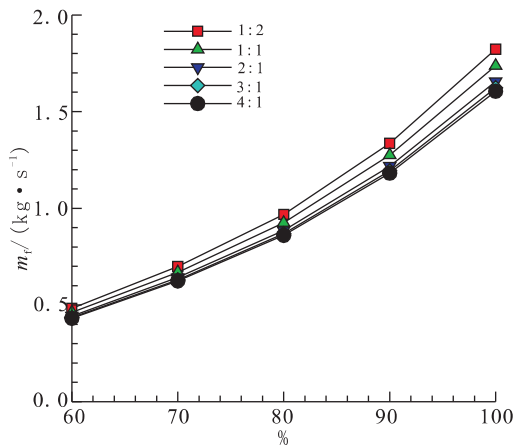


图 3 不同烷/烯比、不同转速下碳氢燃料流量变化

Fig. 3 Variation of mass flow rate of hydrocarbon fuel at different alkane/alkene ratios and rotating speeds

图 3 显示, 随着发动机转速上升, 发动机消耗的碳氢燃料质量流量逐渐升高。发动机转

速升高,意味着涡轮输入功需要提高,在碳氢燃料裂解气物性不变的条件下,其质量流量必然增加。另外,随着裂解气中烷/烯比提高,同一转速下发动机所需的碳氢燃料质量流量逐渐减小。在发动机推力基本不变的情况下,燃料流量减小,则比冲增大(见图4),即在同一转速下,碳氢燃料裂解气中烷/烯比越高,发动机比冲越大。其中,烷/烯比4、转速百分比70%条件下,发动机比冲最高达到约7 644 m/s。

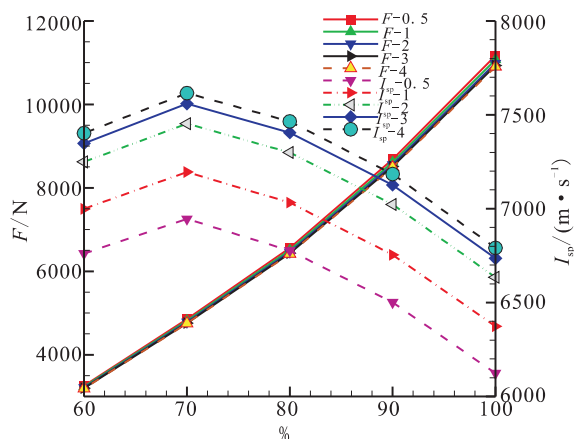


图4 不同烷/烯比、不同转速下推力、比冲变化

Fig. 4 Variation of thrust and specific impulse at different alkane/alkene ratios and rotating speeds

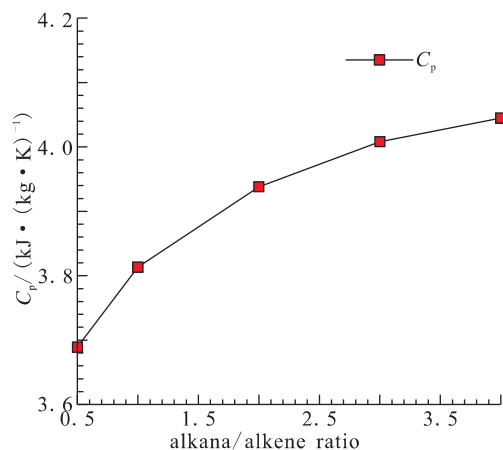


图5 不同烷/烯比时裂解气  $C_p$  变化结果(1000 K)

Fig. 5 Specific heat capacity  $C_p$  of cracking gas at different alkane/alkene ratios at 1000 K

图5给出了1 000 K温度条件下碳氢燃料裂

解气比热容  $C_p$  随烷/烯比变化的结果(SUPERTRAPP<sup>[25]</sup>计算)。图5中显示,随着烷/烯比逐渐升高,裂解气比热容逐渐升高。由于涡轮等熵膨胀功  $C_T = m_f \cdot C_p \cdot \Delta T$ <sup>[26]</sup>,在相同的膨胀功条件下,涡轮前裂解气的  $C_p$  越高,需要供应的碳氢燃料流量  $m_f$  越小,发动机比冲越高。

### 3 结论

提出了一种基于碳氢燃料裂解工作的 ATR 发动机方案,并对特定裂解气成分的碳氢 ATR 发动机性能进行计算,研究了烷/烯比对发动机性能的影响规律,获得结论如下:

- 1) 在同一飞行条件下,随着发动机转速上升,推力逐渐上升,比冲基本呈减小趋势;
- 2) 在同一转速下,碳氢燃料裂解气中烷/烯比越高,发动机比冲越大;
- 3) 随着烷/烯比逐渐升高,裂解气比热容逐渐升高。

基于碳氢燃料裂解气驱动涡轮工作的 ATR 发动机方案原理可行,但发动机比冲等性能仍有提升空间。后续应在改善碳氢燃料热/催化裂解技术,提高碳氢燃料裂解气烷/烯比,增大裂解气做功能力等方面开展进一步工作,以进一步提高发动机性能。

#### 参考文献:

- [1] CHRISTENSEN K. Air turborocket/vehicle performance comparison[J]. Journal of propulsion and power, 1999, 15 (5): 706-712.
- [2] 南向谊,王栓虎,李平. 空气涡轮火箭发动机研究的进展与展望[J]. 火箭推进, 2008, 34(6): 31-35.  
NAN Xiangyi, WANG Shuanhu, LI Ping. Investigation on status and prospect of air turbine rocket[J]. Journal of rocket propulsion, 2008, 34(6): 31-35.
- [3] TANATSUGUN, NARUO Y, ROKUTANDA I. Test results on air turbo ramjet for a future space plane: AIAA 1992-5054 [R]. USA: AIAA, 1992.
- [4] CHRISTENSEN K. Comparison of methods for calculating turbine work in the air turbo rocket[J]. Journal of

- propulsion and power, 2001, 17(2): 256-261.
- [5] SULLEREY R K, PRADEEP A M, KEDIA M. Performance comparison of air turbo rocket engine with different fuel systems: AIAA 2003-4417[R]. USA: AIAA, 2003.
- [6] BUSSI G, COLASURDO G, PASTRONE D. Analysis of air-turbo rocket performance[J]. Journal of propulsion and power, 1995, 11(5): 950-954.
- [7] TANATSUGU N. Development study on air turboramjet [J]. Journal of the Gas Turbine Society of Japan , 2002 , 30 (1) : 69-71.
- [8] MINATO Ryojiro, HIGASHINO Kazuyuki, TANATSUGU Nobuhiro. Design and development of bio-ethanol fueled GG-cycle air turbo ramjet engine for supersonic: UAV ISABE-2013-1654[R]. [S.l.]: ISABE, 2013.
- [9] MINATO R, HIGASHINO H, TANATSUGU N. Design and performance analysis of bio-ethanol fueled GG-cycle air turbo ramjet engine: AIAA 2012-0842[R]. USA: AIAA, 2012.
- [10] HARADA K, TANATSUGU N, SATO T. Development study on precooler for ATREX engine: AIAA 1999-4897 [R]. USA: AIAA, 1999.
- [11] SAWAI Shujiro, SATO Tetsuya, KOBAYASHI Hiroaki, et al. Flight test plan for ATREX engine development: AIAA 2003-7027[R]. USA: AIAA, 2003.
- [12] 赵祖亮. 吸热型碳氢燃料结焦与超临界压力下传热性质研究[D]. 硕士学位论文, 浙江大学, 2006.
- [13] 贺芳, 禹天福, 李亚裕. 吸热型碳氢燃料的研究进展[J]. 导弹与航天运载技术, 2005 (1): 26-29.
- [14] CASTALDI M J, LEYLEGIAN J C, CHINITZ Wallace, et al. Development of an effective endothermic fuel platform for regeneratively-cooled hypersonic vehicles: AIAA 2006-4403[R]. USA: AIAA, 2006.
- [15] 刘志琦. 超燃冲压发动机再生冷却技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [16] 屈云凤. 超燃冲压发动机冷却通道内碳氢燃料传热及裂解特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [17] 王夕. 超临界压力吸热型碳氢燃料热裂解及传热特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [18] 贾贞健. 吸热型碳氢燃料正癸烷高温裂解机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [19] 薛金强, 尚丙坤, 王伟, 等. 吸热型碳氢燃料的裂解及结焦研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2010, 8(3): 8-13.
- [20] 贾贞健, 周伟星, 黄洪雁, 于文力, 碳氢燃料热裂解与引发裂解换热对比实验[J]. 化工学报, 2008, 65(S1):138-143.
- [21] 何龙, 潘富敏, 林瑞森. 吸热型碳氢燃料催化裂解的研究述评[J]. 推进技术, 2001, 22(2): 97-100.
- [22] WARD T A, ERVIN J S, STRIEBICH R C, et al. Simulations of flowing mildly-cracked normal alkanes incorporating proportional product distributions[J]. Journal of propulsion and power, 2004, 20(3): 394-402.
- [23] 咸春雷, 方文军, 张波, 等. 混配型吸热碳氢燃料热裂解及催化裂解[J]. 推进技术, 2003, 24(2): 179-182.
- [24] 蒋榕培, 周悦, 孙海云. 碳氢燃料裂解促进和抑制作用研究[J]. 浙江大学学报(理学版), 2015, 42(4): 436-439.
- [25] ELY J F, HUBER M L. NIST thermophysical properties of hydrocarbon mixtures database (SUPERTRAPP) [R]. USA: NIST, 2016.
- [26] 胡骏, 吴铁鹰, 曹人靖, 航空叶片机原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

(编辑: 马 杰)