

裂解度对甲醇 ATR 发动机的性能影响分析

张留欢, 杜 泉, 逯婉若, 张蒙正, 李光熙
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要:提出了一种基于甲醇裂解工作的 ATR 发动机方案, 并对特定裂解气成分的甲醇 ATR 发动机性能进行计算, 研究了裂解气中裂解度对发动机性能的影响规律。结果表明: 随着发动机转速上升, 推力逐渐上升, 比冲先增加后减小, 在 90% 转速百分比时, 比冲最高; 在同一转速下, 甲醇裂解度越高, 发动机比冲越大, 在裂解度 100%、转速百分比 90% 条件下, 发动机比冲最高达到约 793 s; 随着裂解度逐渐升高, 裂解气比热容逐渐升高。

关键词:碳氢燃料裂解; ATR 发动机; 裂解度

中图分类号:V439 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2019)01-0031-05

Effect of cracking ratio on the performance of methanol ATR engine

ZHANG Liuhuan, DU Quan, LU Wanruo, ZHANG Mengzheng, LI Guangxi
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: A new ATR (Air Turbo Rocket) engine scheme based on the methanol cracking is proposed in this paper. The performance of methanol ATR engine with specific composition of cracking gas is calculated, and the influence of cracking ratio on the engine performance is investigated. The results show that the thrust gradually increases, and the specific impulse increases first then decreases as the engine speed increases. The specific impulse reaches the top at the 90% designed speed. Under the same engine speed, the higher the cracking ratio of methanol, the greater the specific impulse of engine. Under the condition of 100% cracking ratio and 90% rotation speed, the specific impulse is up to 793s. In addition, the specific heat capacity of cracking gas increases with the increase of cracking ratio.

Keywords: hydrocarbon fuel cracking; ATR engine; cracking ratio

0 引言

空气涡轮火箭发动机 (Air Turbo Rocket, ATR) 将火箭发动机与涡轮喷气发动机组合^[1-2], 使涡轮入口气体参数与飞行条件解耦, 拓宽了发动机工作

范围, 其可作为临近空间飞行器的新型动力。

从热力循环方式来说, ATR 发动机主要分为燃气发生器循环和膨胀循环两种方案^[3-7]。燃气发生器循环 ATR 发动机多使用双组元 (液氧/液氢、液氧/甲烷及 H_2O_2 /煤油等) 作为推进剂^[8-9], 这种方

收稿日期: 2017-06-25; 修回日期: 2017-07-20

基金项目: 装备预研航天科技联合基金 (6141B0606260401)

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

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^[10-11],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^[12]。

甲醇(CH_3OH)作为燃料在汽车发动机等内燃机方面的应用研究较多^[13-15],其成分单一,特性稳定,属于清洁燃料。一般利用发动机排气余热将常温液体甲醇加热、蒸发^[16],并在催化剂作用下,将甲醇裂解^[17-19]为 H_2 和 CO 等,进入发动机内燃烧。甲醇裂解气中氢气含量最高可达 67%,可充分利用氢气的燃烧特性,但不需要解决储氢的问题^[20]。同时,裂解气中碳氢化合物含量极少,结焦问题不明显。此外,张琴等^[21]研究了甲醇作为吸热燃料应用于超燃冲压发动机主动冷却技术的可行性,给出了不同涂层催化剂对甲醇分解的影响结果。

本文提出了一种基于甲醇裂解工作的 ATR 发动机(下文简称甲醇 ATR 发动机)方案,详细阐述了该发动机工作原理,并开展了发动机性能计算,研究了甲醇裂解度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及推进剂选取提供新的思路。

1 工作原理及性能

甲醇 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。甲醇 ATR 发动机的特点主要是其气体发生装置利用甲醇受热、催化裂解产生 H_2 和 CO 等气体的特性。甲醇裂解的反应方程为: $\text{CH}_3\text{OH} + 90\text{kJ} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{CO}$, 为吸热反应。图 1 为甲醇 ATR 发动机工作原理示意图。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(固体或液体)产生高温高压富燃燃气驱动发动机短暂工作,之后一定压力、流量的甲醇进入发动机,通过换热装置实现升温裂解,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进行燃烧,生成的高温燃气通过喷管膨胀产生推力。

为方便公式说明,图 2 给出了 ATR 发动机组成及截面示意图。考虑发动机远前端来流截面(序号 0)及进气道入口截面(序号 1),给定发动机入口(即压气机入口)截面序号为 2,发动机出口(即尾喷管出口)截面序号为 8。

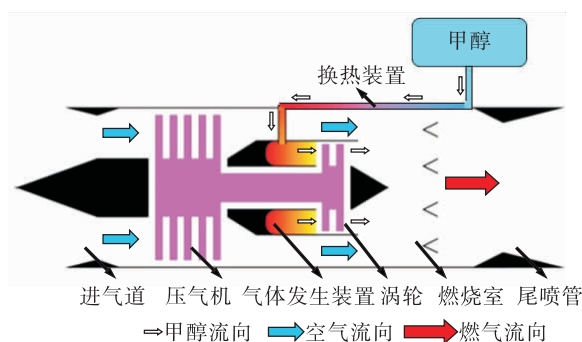


图 1 甲醇 ATR 发动机工作原理示意图

Fig. 1 Sketch of working principle for methanol ATR engine

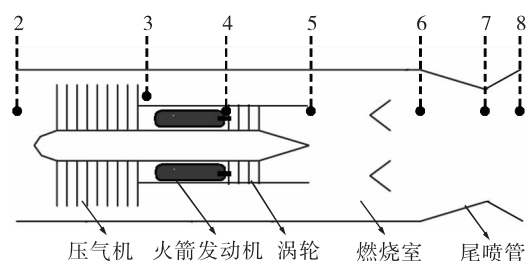


图 2 ATR 发动机及其截面示意图

Fig. 2 Sketch of ATR engine and its sections

根据甲醇 ATR 发动机工作原理,建立了发动机工作平衡方程。

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):

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

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

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(100% 转速百分比)部分组件参数取值见表1。发动机设计点空气流量为 10 kg/s,同时考虑到换热装置设计难度,给定甲醇裂解气总温(涡轮前气体总温)为 1 000 K。

表1 甲醇 ATR 发动机设计点组件参数(部分)

Tab. 1 Component parameters of methanol ATR engine at designed state (partial)	
参数	数值
压气机流量/(kg · s ⁻¹)	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

基于上述发动机参数,对地面状态甲醇 ATR 发动机性能进行了计算。计算过程中,假设甲醇完全裂解为 H₂ 和 CO,则进入涡轮的甲醇裂解气中 H₂ 和 CO 的质量比为 1:7。图3和图4分别给出了完全裂解条件下甲醇 ATR 发动机推力 F 、比冲 I_{sp} 和燃烧室参数(总压 p 、总温 T 、余气系数 α)随发动机转速 n 变化结果(横坐标为转速百分比)。燃烧室参数在较大程度上影响着发动机推力性能。图3显示,随着发动机转速上升,发动机推力逐渐上升,比冲先增大后减小。在 90% 转速时,发动机比冲最高约 793 s(介于火箭发动机与涡轮发动机之间)。甲醇裂解气 H₂ 和 CO 在涡轮中做功后进入燃烧室与空气掺混燃烧,随着转速上升,燃烧室余气系数逐渐减小,燃烧总温与总压逐渐升高,具体如图4所示。

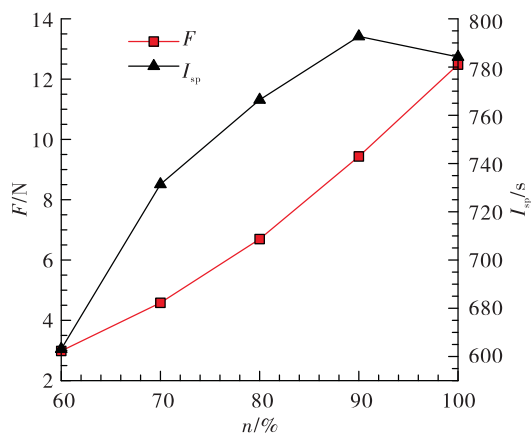


图3 推力、比冲随转速变化结果

Fig. 3 Results of thrust and specific impulse with rotating speed

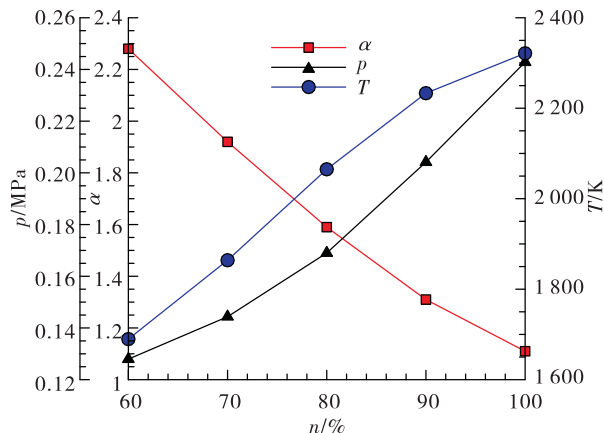


图4 燃烧室参数随转速变化结果

Fig. 4 Results of combustor parameters with rotating speed

2 裂解度影响

甲醇裂解存在不完全现象,此时裂解气主要含有 H₂ 和 CO 以及未裂解的甲醇气体^[22]。采用特殊催化剂(如铜基/钨基催化剂^[21-22])可提高甲醇裂解度 N (甲醇裂解度定义为已裂解甲醇与全部甲醇质量比)。图5和图6分别给出了基于上述发动机组件参数的甲醇 ATR 发动机甲醇流量 m_f 、推力及比冲等随裂解度 N (75%, 80%, 85%, 90%, 95% 及 100%)、转速(60%, 70%, 80%, 90% 及 100%)等的变化结果。其中,假设已裂解的甲醇全部反应为 H₂ 和 CO 气体。

图5显示,随着发动机转速升高,涡轮所需的输

入功逐渐增大,在甲醇裂解气温度不变的条件下,甲醇流量必然升高。同时,注意到在同一转速下,随着裂解度升高,甲醇流量逐渐减小。由图 6 可知,随着发动机转速升高,发动机推力逐渐升高,比冲先升后降,在 90% 转速时比冲达到最高。在同一转速下,随着裂解度升高,发动机推力基本不变,比冲则逐渐升高。结合图 5 可知,随着裂解度升高,甲醇流量减小,在发动机推力基本不变的条件下,使得同一转速下发动机比冲逐渐升高,有裂解度越高,发动机比冲越高。其中,裂解度 100%、转速百分比 90% 条件下,发动机比冲最高达到约 793 s。

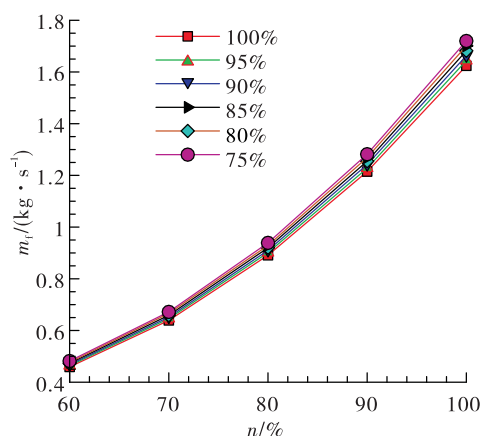


图 5 不同裂解度、不同转速下甲醇流量变化结果

Fig. 5 Mass flow rate of methanol at different cracking ratios and rotating speeds

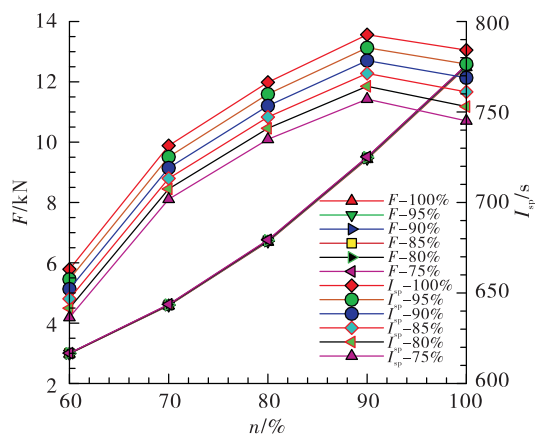


图 6 不同裂解度、不同转速下推力和比冲变化结果

Fig. 6 Thrust and specific impulse at different cracking ratios and rotating speeds

热容 c_p [23] 随裂解度变化的结果。图 7 显示,随着裂解度逐渐升高,裂解气比热容逐渐升高。由于涡轮等熵膨胀功有 $L_T = m_f \cdot c_p \cdot \Delta T$ [24], 在相同的膨胀功条件下,涡轮前裂解气的 c_p 越高,需要供应的甲醇流量 m_f 越小,发动机比冲越高,即同一转速下,甲醇裂解度越高,裂解气 c_p 数值越大,甲醇流量越小,发动机比冲越高。

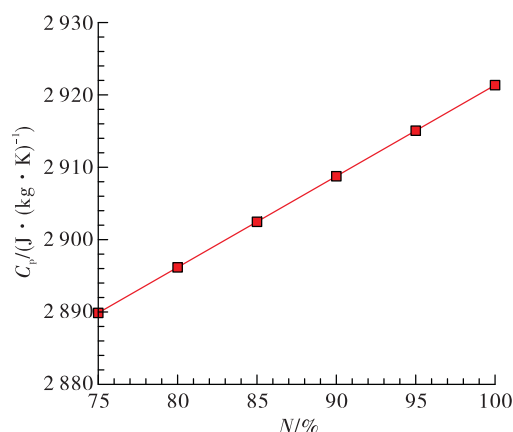


图 7 不同裂解度时裂解气 c_p 变化结果

Fig. 7 Specific heat capacity of cracking gas at different cracking ratios

3 结论

提出了一种基于甲醇裂解工作的 ATR 发动机方案,并对裂解度 100% 的甲醇 ATR 发动机性能进行计算,研究了裂解度对发动机性能的影响规律,获得以下结论:

- 1) 随着发动机转速上升,推力逐渐上升,比冲先增加后减小。在 90% 转速百分比时,比冲最高。
- 2) 在同一转速下,随着裂解度升高,比冲逐渐升高。在裂解度 100%、转速百分比 90% 条件下,发动机比冲最高达到约 793 s。
- 3) 同一转速下,甲醇裂解度越高,裂解气比热容数值越大。

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,王拴虎,李平. 空气涡轮火箭发动机研究的进展

图 7 给出了 1 000 K 温度条件下甲醇裂解气比

- 与展望[J]. 火箭推进, 2008, 34(6): 31-35.
- NAN X Y, WANG S H, LI P. Investigation on status and prospect of air turbine rocket[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2008, 34(6): 31-35.
- [3] TANATSUGU N, NARUO Y, ROKUTANDA I. Test results on air turbo ramjet for a future space plane: AIAA1992-5054[R]. Reston: 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 K, PRADEEP M, KEDIA M. Performance comparison of air turbo rocket engine with different fuel systems: AIAA2003-4417[R]. Reston: 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. Developments in high speed vehicle propulsion systems[M]. Reston: AIAA, 1996.
- [8] RYOJIRO M, KAZUYUKI H, NOBUHIRO T. Design and development of bio-Ethanol fueled GG-cycle air turbo ramjet engine for supersonic UAV: ISABE - 2013 - 1654 [R]. Busan: ISABE, 2013.
- [9] MINATO R, HIGASHINO H, TANATSUGU N. Design and performance analysis of bio-ethanol fueled GG-cycle air turbo ramjet engine: AIAA2012 - 0842 [R]. Reston: AIAA, 2012.
- [10] HARADA K, TANATSUGU N, SATO T. Development study on precooler for ATREX Engine: AIAA1999 - 4897 [R]. Reston: AIAA, 1999.
- [11] SHUJIRO S, TETSUYA S, HIROAKI K, NOBUHIRO T. Flight test plan for ATREX engine development: AIAA2003 - 7027[R]. Reston: 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]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [13] 王艳华, 郑国璋. 甲醇燃料在车用发动机上的应用研究[J]. 内燃机工程, 2005, 26(2): 22-25.
- [14] 朱建军, 寇子明, 王淑平, 等. 纯甲醇发动机冷起动系统的研发[J]. 汽车工程, 2011, 33(4): 298-302.
- [15] 杨蔚权, 许世海. 甲醇作为发动机燃料的使用方法[J]. 内燃机, 2005(5): 32-35.
- [16] 王放. 缸内直喷点燃式甲醇发动机冷启动试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [17] 王进. 纯甲醇裂解气发动机试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [18] 姚春德, 李旭聪, 徐元利. 甲醇裂解气发动机排放性能试验[J]. 内燃机学报, 2012, 30(2): 118-123.
- [19] 姚春德, 徐元利, 杨建军, 等. 甲醇裂解气对点燃式发动机性能影响研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(2): 353-356.
- [20] 杨永广. 甲醇裂解气发动机的试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [21] 张琴, 刘国柱, 李国柱, 等. 主动冷却通道内甲醇催化分解吸热过程[J]. 推进技术, 2015, 36(6): 927-932.
- [22] 姚春德, 李旭聪, 唐超, 等. 铜基/钨基催化剂甲醇裂解气发动机的燃烧特性[J]. 内燃机学报, 2012, 30(6): 486-491.
- [23] ALEXANDER B, BRANKO R. Third millennium ideal gas and condensed phase thermochemical database for combustion with updates from active thermochemical tables [R]. Argonne: Argonne National Laboratory, 2005.
- [24] 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)