

文章编号:1000-8055(2012)07-1537-05

不同燃料对涡轮增压器试验的影响

霍 磊, 王洪铭

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 利用理论分析和试验方法对燃气发生器采用不同燃料时其涡轮性能的影响进行了研究. 结果表明:在涡轮试验中,醇类燃料由于溶水度的随环境而变化,得到的涡轮特性是不定数;采用醇类燃料,其燃烧产物对涡轮部件增加额外的腐蚀,造成涡轮部件安全隐患;采用汽油为燃料进行涡轮试验,可以得到确定的涡轮特性,其试验结果可以为改进涡轮性能提供依据.

关 键 词: 航空燃料; 燃气发生器的燃料; 涡轮特性; 涡轮增压器试验; 溶水度不确定性

中图分类号: V312⁺. 1

文献标志码: A

Effect of various fuels used on turbocharger experiment

HUO Lei, WANG Hong-ming

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and astronautics,
Beijing 100191, China)

Abstract: Effect of various fuels used in gas generator on the performance of turbocharger was investigated by theoretical analysis and experiment. The results show that in the turbine test, the performance of the turbine is uncertain due to the uncertain water capacity of the alcohol fuel. The combustion products lead to extra corrosion of turbine components, which is a hidden danger to the turbine. The petrol can lead to certain turbine performance and the corresponding test result can provide evidence for the improvement of turbine performance.

Key words: aviation fuel; fuel of gas generator; turbine performance; turbocharger experiment; uncertain water capacity

在亚燃或超燃冲压发动机地面试验中,对来流空气用燃烧加热方式模拟高马赫数飞行条件^[1-3],往往使用碳氢燃料(包括乙醇等)燃烧并补氧,带来的后果是进入发动机燃烧室的气体中含有“污染组分”,主要是 H_2O 和 CO_2 ^[4]. 对空气的燃烧过程产生一定的物理、化学效应. 这样得出的地面试验结果与真实飞行过程有差异,如不经过修正推广到飞行中,往往带来偏差,甚至不正确的后果.

在国内外车用或航空内燃机涡轮增压器试验中,普遍采用原内燃机的燃料驱动涡轮增压器^[5-7]. 试验表明:他们的结果可以正确的应用到内燃机上. 但是,有些试验中不采用原内燃机燃料,而是用醇类燃料驱动涡轮,没有考虑到采用不同燃料对试验结果的影响,对此问题国内外文献中鲜有系统研究. 因此,本文依据有机化学^[8]、工程热力学^[9]和涡轮增压器工作原理^[10-14],对比汽油醇类等不同燃料的物理化学性质,得出在燃烧

收稿日期:2011-08-31

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120801.1438.201207.1537_014.html

作者简介:霍磊(1983—),男,黑龙江牡丹江人,博士生,主要从事涡轮增压器设计及机理研究.

过程中,其燃气成分、热力参数的不同,通过理论分析和试验对比手段,研究驱动涡轮的燃气发生器使用不同燃料对涡轮性能参数及对涡轮部件腐蚀^[15]的影响.

1 涡轮增压器试验方案

图 1 给出了涡轮增压器试验方案示意图.来自空压机的空气经膨胀制冷后进入增压器,增压后测流量并分流用于涡轮轴承冷却,经出口气量调节阀排入大气.另一路空气来自空压机,为了使涡轮充分利用排气管的压力脉动能量,设有电机控制的脉冲气流发生器,其脉动压力范围用调压阀调节.用脉动流量计测量其空气流量.将调制好的空气送入燃气发生器,供油燃烧后送入涡轮.有一旁路为可控的排气活门(TCU),与涡轮后的燃气汇合送往冷却器及水环真空泵.在冷却器前有旁路调压阀吸入大气以调节涡轮后反压.水环真空泵将冷却升压后的燃气排入大气.

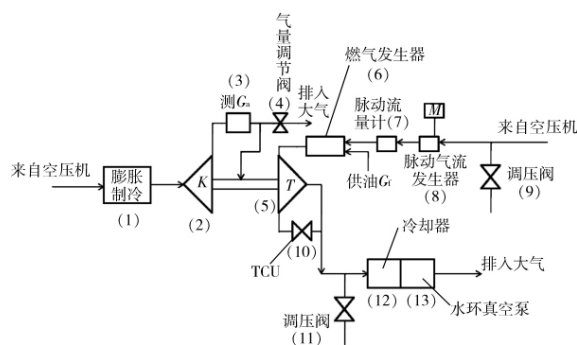


图 1 涡轮增压器试验方案示意图

Fig. 1 Turbocharger test sketch

试验应满足以下条件:

1) 保持涡轮与增压器流量平衡

$$G_t = (1 - c + f) G_k$$

其中 G_t 为涡轮流量, G_k 为增压器流量, f 为燃气发生器燃料的油气比, c 为涡轮轴承冷却气的含量.

2) 转速相等

增压器与涡轮共轴 $n_t = n_k$.

3) 功平衡

$$L_t \eta_m (1 - c + f) = L_k$$

其中 L_t 为涡轮功, η_m 为机械效率, L_k 为增压器耗功.

2 汽油和醇类燃料的物理化学性质

首先给出了汽油和甲醇、乙醇三种燃料的有关物理化学性质,具体参数见表 1.从表 1 中可以看到,汽油的热值最高,为甲醇的 2.15 倍,为乙醇的 1.6 倍,即燃烧相同质量的汽油和醇类燃料,汽油放出的能量最多.表 1 还反映出甲醇、乙醇极易溶于水,溶水度为 ∞ ,而汽油溶水度甚微.

表 1 汽油和醇类燃料的有关性质

Table 1 Properties of petrol and alcohol fuel

燃料	分子式	低热值/ (MJ/kg)	溶水度/% (25 °C)	理论 空燃比
汽油	C ₈ H _{16.5}	43	≤ 0.025	14.9
甲醇	CH ₃ OH	19.94	∞	6.5
乙醇	C ₂ H ₅ OH	26.8	∞	9

3 汽油和醇类燃料的燃气成分及热力参数

依据燃料的理化性质,可以得出在空气中燃烧到 950 °C 的化学反应式,计算得出其燃气成分及热力参数.具体参数见表 2.从表 2 中可以看到醇类燃料中水蒸气含量为汽油的 1.46~2.66 倍;醇类燃料的油气比为汽油的 1.67~2.59 倍.

4 在高空增压条件下不同燃料对涡轮膨胀比的影响

本节采用理论分析的方法,研究了不同燃料对涡轮膨胀比的影响.涡轮增压器工作中,必须满足增压器和涡轮功相等的条件,可以由此得到增压器增压比和涡轮膨胀比的关系 $\pi_t^* = f(\pi_k^*)$. 计

表 2 燃气成分及热力参数

Table 2 Gas components and thermodynamics parameters

燃料	H ₂ O/%	CO ₂ /%	O ₂ /%	N ₂ /%	比热比	气体常数/(J/kg·K)	油气比
汽油	3.39	8.04	13.85	74.72	1.341	288.6	0.026
甲醇	6.57	8.03	13.19	72.21	1.337	294.2	0.062
溶水甲醇	9.05	8.64	11.96	70.35	1.333	298.0	0.069
乙醇	4.97	8.11	13.48	73.44	1.339	291.4	0.044
溶水乙醇	6.45	8.28	15.26	70.01	1.336	293.0	0.047

算中没有考虑采用多级增压、级间有中冷器的影响. 计算中假定增压器进口总温 $T_h^*=217\text{ K}$, 燃气发生器进口总温 $T_{30}^*=300\text{ K}$, 涡轮进口总温 $T_3^*=1223\text{ K}$, 涡轮效率 $\eta_t^*=0.7$, 机械效率 $\eta_m^*=0.95$, 增压器效率 $\eta_k^*=0.65$. 表 3 和图 2 给出了采用不同燃料时涡轮膨胀比随增压器增压比的变化, 其中下标 g 表示汽油, m 表示甲醇, wm 表示溶水甲醇, e 表示乙醇, we 表示溶水乙醇.

表 3 采用不同燃料时涡轮膨胀比随增压器增压比的变化

Table 3 Expansion ratio change with pressure ratio for different fuels

π_k^*	π_{tg}^*	π_{tm}^*	π_{twm}^*	π_{te}^*	π_{twe}^*
4	2.29	2.18	2.14	2.23	2.21
6	3.29	3.04	2.96	3.16	3.12
8	4.48	4.05	3.91	4.25	4.18
10	5.92	5.22	4.97	5.55	5.43
12	7.66	6.60	6.26	7.09	6.91
14	9.77	8.22	7.74	8.94	8.67
16	12.34	10.13	9.46	11.15	10.77

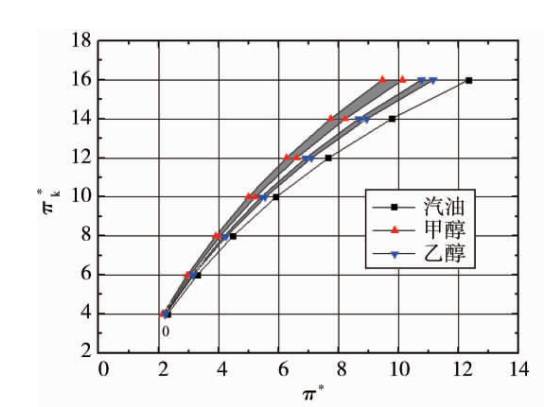


图 2 采用不同燃料时涡轮膨胀比随增压器增压比的变化

Fig. 2 Expansion ratio change with pressure ratio for different fuels

由于燃料不同、燃气成分以及热力参数不同, 从表 3 和图 2 可以得到以下结论:

- 1) 随着增压器增压比增加, 涡轮膨胀比是增加的.
- 2) 在增压器增压比一定的情况下, 采用汽油燃料的涡轮膨胀比 π_t^* 是一个定值.
- 3) 在增压器增压比一定的情况下, 因为溶水度的不确定, 采用醇类燃料的涡轮膨胀比 π_t^* 是不

确定的.
4) 采用醇类燃料的涡轮膨胀比 π_t^* 不等于采用汽油燃料的涡轮膨胀比 π_t^* .

5 不同燃料对涡轮特性的影响

本节依据某涡轮增压器的地面模拟条件和要求, 进行了试验. 得到了采用不同燃料的涡轮特性. 具体数据见表 4 和图 3, 并对转速和流量进行了无量纲化, 见式(1)、式(2). 试验中没有计及随高度增加, 雷诺数降低对增压器和涡轮带来的影响, 其中 T_3^* 表示涡轮进口总温, p_3^* 表示涡轮进口总压.

无量纲转速

$$\bar{n}_t = \frac{(n_t / \sqrt{T_3^*})}{(n_t / \sqrt{T_3^*})_{\max}} \tag{1}$$

无量纲流量

$$\bar{G}_t = \frac{(G_t \sqrt{T_3^*} / p_3^*)}{(G_t \sqrt{T_3^*} / p_3^*)_{\max}} \tag{2}$$

表 4 采用不同燃料时的涡轮特性

Table 4 Turbine performance for different fuels

高度 H/km	$\bar{n}_t$	$\bar{G}_t$	π_{tg}^*	π_{te}^*	π_{twe}^*
0	0.53	1.00	1.22	1.21	1.21
2.0	0.71	1.00	1.43	1.41	1.41
2.0	0.61	0.94	1.37	1.36	1.36
4.5	0.83	0.94	1.68	1.66	1.66
5.5	0.95	0.92	1.84	1.81	1.80
7.5	1.00	0.87	1.86	1.83	1.82

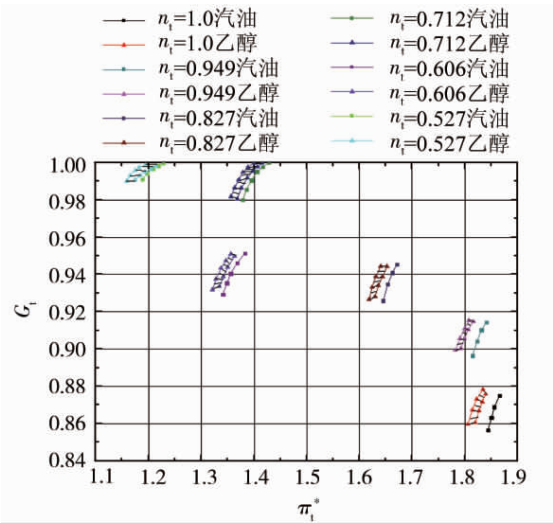


图 3 采用不同燃料时的涡轮特性

Fig. 3 Turbine performance for different fuels

从图 3 中可以看到不同转速下涡轮膨胀比随流量的变化. 涡轮增压器在 $H=0\sim2.0\text{ km}$ 之间, 发动机进入起飞状态. 节风门开度最大为 115%. 这时发动机功率最大, 要求流量 $\overline{G}_t=1.0$, 而转速 $\overline{n}_t<1.0$. 当 $H=2.0\sim7.5\text{ km}$ 之间, 发动机转为设计状态, 节风门关小为 100%, 流量 $\overline{G}_t$ 减小到 0.94~0.87. 涡轮增压器转速 $\overline{n}_t$ 逐步增加到 1.00, 这时 π_t^* 增加到最大. 从表 4 和图 2 可以得到以下结论:

- 1) 在一定的高度下, 当节风门开度一定时, 采用汽油为燃料, 涡轮膨胀比 π_t^* 是一个定值.
- 2) 在一定的高度下, 当节风门开度一定时, 采用醇类燃料, 因溶水度不确定, 涡轮膨胀比 π_t^* 是不确定的.
- 3) 采用乙醇为燃料得出的涡轮特性不等于采用汽油为燃料得出的涡轮特性.

6 不同燃料的燃烧产物对涡轮腐蚀性的影响

表 5 给出了不同燃料燃烧产物的混合气氛中碳钢及不锈钢的氧化增重. 试验条件为 $900\text{ }^\circ\text{C}$. 混合气氛的腐蚀破坏力较单一气体介质更为强烈. 原因是气体介质使金属表面进行着多元不均匀的化学反应, 产生成分不均匀, 含有大量晶体结构缺陷的多种反应物, 其氧化锈皮是不耐腐蚀的.

表 5 混合气氛中碳钢及不锈钢的氧化增重
($900\text{ }^\circ\text{C}$, 24 h, mg/cm²)

Table 5 Oxidation mass gain of carbon steel and stainless steel in mixed gas
($900\text{ }^\circ\text{C}$, 24 h, mg/cm²)

混合气氛	碳钢	18-8 不锈钢
大气	57.2	0.46
纯空气+5% CO ₂	76.9	1.17
纯空气+5% H ₂ O	74.2	3.24
大气+5% H ₂ O+5% CO ₂	100.4	4.58

从表 2 得知, 醇类燃料的燃气中 H₂O 含量为汽油的 1.46~2.66 倍, 其 CO₂ 含量也超过 5%. 高温条件下, 它们对涡轮产生额外的腐蚀增量. 我国对汽车上使用《变性燃料乙醇》提出的强制性标准, GB18350-2001 中规定 E10 乙醇中水含量 $\leq 0.8\%$. 在 GB18351-2004《车用乙醇汽油》中, 强制性规定 E10 汽油中水分含量 $\leq 0.2\%$. 此外, 试验发现对汽车零部件金属腐蚀的原因之一是由于乙醇中乙

酸引起, 因此在 GB18350-2001 中也严格限定乙酸的含量. 上述两个国家标准中对 E10 变性乙醇和 E10 汽油提出了严格的质量安全规定. 因此采用醇类燃料会对涡轮的安全性、可靠性带来不利影响.

7 结 论

本文通对涡轮增压器试验中燃气发生器采用不同燃料对涡轮部件及性能影响的研究, 得到以下结论:

- 1) 采用醇类燃料进行涡轮试验, 由于溶水度的不确定性, 得到的涡轮特性是不确定的, 得不到涡轮本身的特性曲线, 其试验结果不能作为改进涡轮的依据.
- 2) 采用醇类燃料, 其燃烧产物对涡轮部件增加额外的腐蚀, 造成涡轮部件可靠性、安全性的隐患.
- 3) 采用汽油为燃料进行涡轮试验, 可以得到确定的涡轮特性. 并且在航空内燃机与涡轮增压器共同工作中使用汽油为燃料已经有多年的实践经验, 其试验结果可以作为真实的涡轮特性. 正确的使用涡轮燃料, 采用正确的试验方法, 是保证提高航空内燃机高空性能的基本依据.

参考文献:

[1] 谭建国, 黄国庆, 潘宇, 等. 凹腔型亚燃冲压发动机燃烧效率研究[J]. 航空动力学报, 2011, 26(6): 1415-1419.
TAN Jianguo, HUANG Guoqing, PAN Yu, et al. Research on combustion efficiency of cavity-type ramjet[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(6): 1415-1419. (in Chinese)

[2] 李大鹏, 丁猛, 梁剑寒, 等. Ma=4 液体碳氢燃料超燃冲压发动机点火试验[J]. 推进技术, 2009, 30(4): 385-400.
LI Dapeng, DING Meng, LIANG Jianhan, et al. Ignition experimental for liquid hydrocarbon fueled scramjet with simulated flight Mach 4[J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(4): 385-400. (in Chinese)

[3] 吴海燕, 周进, 邵艳, 等. 超声速燃烧气动斜波喷注器研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(4): 760-765.
WU Haiyan, ZHOU Jin, SHAO Yan, et al. Study of aerodynamic ramp injector in supersonic combustion [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(4): 760-765. (in Chinese)

[4] 罗飞腾, 宋文艳, 刘昊. 污染空气对氢燃料超声速燃烧室性能的影响[J]. 推进技术, 2010, 31(4): 401-405.
LUO Feiteng, SONG wenyan, LIU Hao. Experimental investigation for vitiated air effects on hydrogen-fueled supersonic combustor performance[J]. Journal of Propulsion Technology, 2010, 31(4): 401-405. (in Chinese)

[5] 朱志富, 马超, 马朝臣, 等. 小流量下离心压气机流场分析

及喘振机理研究[J]. 车用发动机, 2011 (2): 37-41.

ZHU Zhifu, MA Chao, MA Chaochen, et al. Flow field analysis and surge mechanism discussion of centrifugal compressor in low flow[J]. Vehicle Engine, 2011 (2): 37-41. (in Chinese)

[6] 徐斌,薄东,尧辉. 高原发动机涡轮增压的效率修正计算[J]. 车用发动机, 2009(6): 7-10.

XU Bin, BO Dong, YAO Hui. Correction computation of engine turbocharger efficiency under plateau conditions [J]. Vehicle Engine, 2009(6): 7-10. (in Chinese)

[7] 于立国,王建国,马朝臣,等. 一种涡轮增压器涡轮非稳态特性试验台[J]. 车用发动机, 2009(3): 25-35.

YU Liguo, WANG Jianguo, MA chaochen, et al. A turbo-charger turbine unsteady characteristic test bench[J]. Ve-

hicle Engine, 2009(6): 25-35. (in Chinese)

[8] 张生勇. 有机化学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[9] 刘宝兴. 工程热力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[10] 朱大鑫. 涡轮增压与涡轮增压器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.

[11] 陆家祥. 车用内燃机增压[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.

[12] 斯廖赫钦科. 空气喷气发动机原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.

[13] 杨策,施新. 径流式叶轮机械理论及设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.

[14] 黄乙武. 液体燃料的性质和应用[M]. 北京: 烃加工出版社, 1985.

[15] 孙秋霞. 材料腐蚀与防护[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.