

文章编号: 1000-8055(2000) 01-0078-03

燃烧室进口高温高压状态下一氧化碳排放特性研究

孟祥泰 刘高恩
(北京航空航天大学 四系, 北京 100083)

摘要: 对装有双旋流空气雾化喷嘴的试验燃烧室在宽广进口总温、进口总压范围以及燃烧室油气比范围内的一氧化碳排放特性进行了试验研究。取得了燃烧室在高温高压状态下工作时一氧化碳排放特性结果。并且根据已有一氧化碳排放指数经验模型, 计算了相同工况下该试验燃烧室一氧化碳排放量。经验模型给出了与试验值较一致的结果。

关键词: 航空发动机; 燃烧室; 排放
中图分类号: V 231.2 文献标识码: A

1 引言

对试验燃烧室在宽广进口总温(300~900 K)、宽广进口总压(2.0~4.1 MPa)以及燃烧室工作范围内的总油气比($f/a=0.010\sim0.028$)的一氧化碳排放特性进行了研究。上述进口总温、进口总压基本上覆盖了目前现役发动机的参数^[1]。进口加温采用直接加热器。研究目的是为获取燃烧室在高温高压进口条件下、燃烧室油气比工作范围内的一氧化碳排放特性。从燃烧室研制表明^[2, 3], 在初试阶段, 通常由于设备流量及承压能力限制, 一般对燃烧室性能研究采用降工况进行的, 然后通过某些特定方法将试验值修正到实际循环状态下。而本文所述排放特性是在燃烧室工作状态下获得的, 因此, 该结果对发动机燃烧室性能、设计定型都极具参考价值。

2 试验台及试验数据处理

试验台配置示意如图 1 所示。试验燃烧室上游是直接加热器, 之后是双层多孔挡油板, 目的是使未完全燃烧产物继续反应。另外, 从挡板后到试验燃烧室的进口, 有较长一段进口段, 使直接加热器出口的一氧化碳有足够长的时间进行氧化反

应, 上述因素能够减小加热器对燃烧室排放特性的影响。在燃烧室进口处测量气体进口总温、总压。在燃烧室出口处通过水冷采样感头采集燃气, 采样孔共设 3 个, 按等环面布置, 样气送入燃气分析仪进行分析, 最终得出的是燃烧室出口一氧化碳平均浓度。

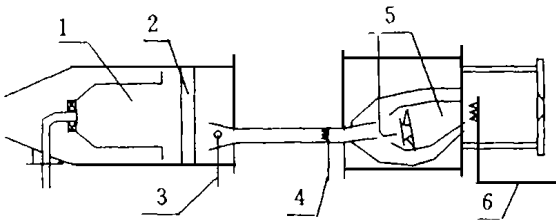


图 1 试验台(1. 直接加热器 2. 挡板 3. 测温热电偶
4. 总压感头 5. 试验燃烧室 6. 燃气采样感头)

试验燃烧室用双旋流杯雾化喷嘴雾化燃油及稳定火焰, 形成主燃区流型。燃烧室头部高度 85 mm, 燃烧室长度 175 mm。主燃孔设在第二段气膜上, 掺混孔在第四段气膜上。气膜冷却方式为冷却环带缝式气膜冷却, 燃油喷嘴为双油路离心喷嘴。

为研究进口总压、进口总温和总油气比变化时对一氧化碳排放特性影响, 将试验时的工况作如下设定: 进口总压、总油气比保持不变, 进口总

温从 300 K (环境温度) 增加至 900 K, 考察进口总温的影响。调整进口总压, 进口总温亦从 300 K 增加至 900 K, 考察在相同进口总温、总油气比下进口总压的影响。维持进口总压、总温不变, 调整总油气比, 考察总油气比影响。该试验燃烧室进口流量在 2.0 至 3.8 kg/s。

一氧化碳排放数据由燃气采样测量分析所得。一氧化碳(CO)测量采用美国 Eneae 燃烧效率分析仪进行分析, 得出样气中一氧化碳浓度。考虑到与其它燃烧室排放物的数据进行比较, 需将上述测量值换算为排放物指数(Emission Index, 简称为 EI, 单位是 g/kg fuel), 具体的计算公式为: $EI_{CO} = \rho_{CO} [CO] V_g / \dot{m}_f$ 。式中: $[CO]$ 是试验时由仪器测出的一氧化碳体积浓度, ρ_{CO} 是一氧化碳在燃烧室出口处的密度, V_g 是燃烧室出口处燃气体积流量, $\dot{m}_f$ 为燃烧室燃油流量。

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

在燃烧室进口总温为常温(300 K 左右)、进口总压为 2.5 MPa 的情形时, 研究了燃烧室总油气比对一氧化碳的影响, 图 2 表示了这种影响。从图可见, 总油气比 f/a 上升, 一氧化碳排放量迅速下降, 总油气比从 0.01 升至 0.02 时, 一氧化碳的排放指数 EI 从近 50 g/kg 燃油降至 20 g/kg 燃油。下降非常显著原因是随着总油气比的增加, 主燃区的温度显著升高, 化学反应速率增快, 导致燃烧的完全程度增加, 因此这项排放指数下降。

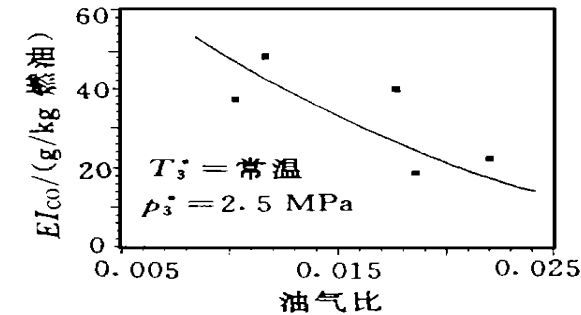


图 2 总油气比与一氧化碳排放量关系

在相同的进口总压条件下, 基本接近的总油气比情形下, 研究了进口总温 T_3^* , 对一氧化碳排放量的影响。图 3 表示了进口总温 T_3^* 增加时的影响, 图中进口总压为参变量, 共有 3 组数据。进口总温 T_3^* 从 300 K 升至 900 K 时, 一氧化碳排放指数 EI 下降了一个数量级。这表明, 进口总温是十分重要的影响因素。由于数据是在 3 组不同

进口总压下获得的, 在每一组相同压力参数下都表现了这个趋势。

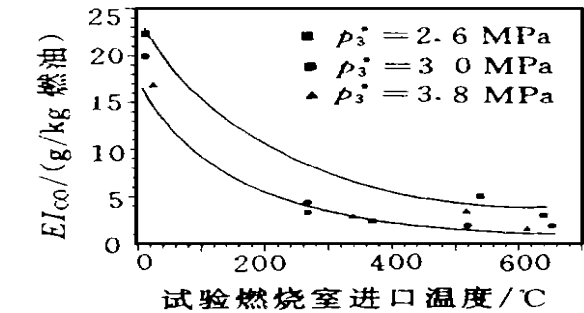


图 3 进口总温与一氧化碳排放量关系

从图中还可以分析压力变化的影响。在图 3 中, 进口总温为大气温度(300 K) 时, 随燃烧室进口总压增加, 一氧化碳排放指数 EI 有明显降低, 而在进口总温增加时, 这个趋势变得不明显。说明在高进口总温条件下, 压力的影响减弱。

分析原因是: 一氧化碳是不完全燃烧产物, 化学动力因素起主要作用, 与温度直接相关, 碳氢燃料的反应为 1.2 至 1.5 级反应, 压力升高将促进燃烧反应的完全程度。进口总温增加, 在相同总油气比条件下, 意味着主燃区的温度升高, 化学反应的速率增加, 因此一氧化碳的排放指数显著降低。另外, 进口总压增加, 化学反应的速率也增加, 一氧化碳的排放指数从理论上应该有一定程度降低。总之, 燃烧室进口总温、总压的增加将导致一氧化碳排放量的降低。

3.2 一氧化碳经验计算模型

对于一氧化碳的经验计算模型, Lefebvre 从 F100, F101, J79-17A, J79-17C 及 TF41 发动机燃烧室排放数据整理得到一个通用计算公式^[4]。由于试验燃烧室与 F101 发动机燃烧室结构有相似之处, 亦可用此公式进行计算。该模型考虑了化学动力因素的影响、燃烧室掺混强度的影响、燃烧区停留时间的影响及雾化和蒸发占用燃烧区容积的影响。该经验模型为:

$$EI_{CO} = 86 m_a T_{pz} \frac{\exp(-0.00345 T_{pz})}{V_c - V_e} \cdot (\Delta P_L / P_3^*)^{0.5} P_3^{*1.5} \text{ g/kg}$$

式中: m_a 是通过燃烧室的空气流量, T_{pz} 是主燃区温度, V_c 是掺混孔前燃烧室容积, 即所谓的燃烧区体积, V_e 是考虑了由于燃油未蒸发前所占用的燃烧室容积, $\Delta P_L / P_3^*$ 是火焰筒压降, P_3^* 是燃烧室进口总压, 其中, 主燃区温度 T_{pz} 以及未蒸发燃油所占体积 V_e 计算分别为: $T_{pz} = T_3 + \Delta T_{pz}$ 和

$V_e = 0.55 \times 10^{-6} f_{pz} m_a d_0^2 / (\rho_{pz} \beta)$ 。式中: f_{pz} 是主燃区空气流量分配的百分数, d_0 是燃油的平均雾化直径, β 是燃油的蒸发常数。

分析经验模型, 可以清楚地得到一氧化碳排放指数与总油气比、进口总温及进口总压之间的关系。显然, 总油气比增加与进口总温升高, 直接使主燃区温度升高, 一氧化碳排放指数增加与主燃区温度成正比, 即 $EI_{CO} \propto T_{pz}$, 而减少却与主燃区温度成指数关系, 即 $EI_{CO} \propto e^{-0.003457 T_{pz}}$ 。二者相比, 减少量远大于增加量, 总的趋势是使一氧化碳的排放量大幅度降低。

另外一点, 由于火焰筒压降变化在整个试验范围内并不太大, 而流量与进口总压成正比, 因此, 一氧化碳的排放指数正比于 $1/p_3^{*0.5}$, 即 $EI_{CO} \propto 1/p_3^{*0.5}$ 。换言之, 进口总压的增加, 有利于一氧化碳生成量的减少。在图 3 中, 进口常温时的试验结果清晰地表达了这一点。但由于加热器直接加热的影响, 在较高进口总温时这个趋势不明显, 但也基本反映了本规律。

根据试验参数及试验燃烧室的几何尺寸、流量分配等参数, 采用经验模型的预估结果与本试验结果的对照见图 4。在试验参数范围内, 进口

气体总温为常温时, 试验值与模型预估值取得了较好的一致性, 而在进口总温大于 450 K 时, 试验值要高于模型预估值, 原因是直接加热器中未完全燃烧产物的影响, 由于试验设备, 经费等因素限制, 未能对直接加热器的影响进行进一步的研究。

4 结 论

通过研究, 取得了大量对该燃烧室设计、定型有意义、有价值的结果。同时采用了已有的一氧化碳经验模型, 预估了相同工况下一氧化碳之值。主要结论如下: (1) 在相同进口总温水平下, 一致的总油气比条件下, 随着进口总压提高, 一氧化碳的排放量减少。(2) 在相同进口总温、进口总压水平下, 总油气比提高, 一氧化碳减少。(3) 一氧化碳经验模型预估值与试验值取得了较好的一致性。

总之, 通过本研究, 明确了燃烧室在高温高压状态下的一氧化碳排放特性变化规律。另外, 验证了一氧化碳排放经验模型, 该模型可以用来预估本燃烧室的一氧化碳排放特性。本文的研究成果对发动机燃烧室研制具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- 1 方昌德主编. 世界航空发动机手册[M]. 航空工业出版社, 1996
- 2 Gleason C C, Oller T L, Shayeson M W, Bahr D W. Evaluation of Fuel Character Effects on F101 Engine Combustion System[R]. AFAPL- TR- 79- 1818, June, 1979
- 3 刘高恩, 吴文东编译. 高效节能发动机文集(第四分册)[M]. 北京: 航空工业出版社, 1991
- 4 Lefebvre A H. Fuel Effects on Gas Turbine Combustion-Liner Temperature, Pattern Factor and Pollutant Emissions[J]. Journal of Aircraft, 1984, 21(11): 887- 898

(责任编辑 杨再荣)

An Investigation on Carbon Monoxide Emission of Testing Combustor with High Inlet Pressure and Temperature

Meng Xiangtai, Liu Gaoen

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The emission characteristics of carbon monoxide were investigated in the testing sector of a combustor with double swirlers. The test condition covered wide range of inlet pressure, inlet temperature and fuel-air ratio, including the highest pressure up to 4 MPa. The carbon monoxide emission data were obtained from the test. The test data are consistent with the results calculated from the Lefebvre's empirical model, based on available data.

Key words: aircraft engines; combustion chamber; blowdown

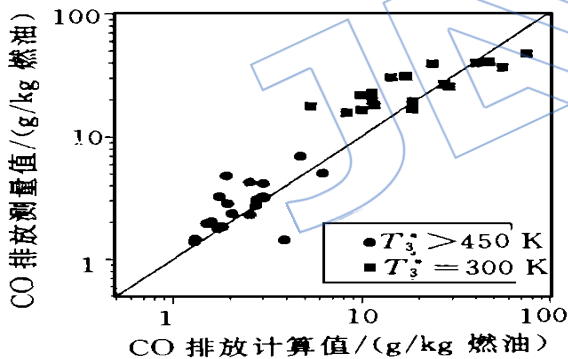


图 4 一氧化碳排放量试验值与模型预估值比较