

文章编号: 1000-8055(2008)03-0465-05

现代军用涡轮喷气发动机主燃油系统燃油积沉实验

李 敏, 肖维慧, 王洪铭

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 通过实验, 采用称重法研究了国产航空燃油 RP-3 在高热负荷下的燃油积沉率与温度的关系. 结果表明, 在一般情况下, 其积沉率低于美国 JP-4, JP-5, Jet A, 高于 Jet 8. 实验发现燃油滤网和离心喷嘴切向槽道上均有不同程度的积沉物.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 涡轮喷气发动机; 主燃油系统; 燃油积沉率; 胶质
中图分类号: V231.25 **文献标识码:** A

Fuel deposit experiment on main fuel system of modern military jet engine

LI Min, XIAO Wei hui, WANG Hong ming

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The relationship between fuel deposit and temperature of Chinese jet fuel RP-3 was measured under crucial thermal condition using weighting method. The results show that, the deposit rate is below that of American jet fuel JP-4, JP-5, Jet A, but higher than Jet 8. The various degrees of deposit occurred on the filter and the tangential channel of the nozzle swirler.

Key words: aerospace propulsion system; modern military jet engine; main fuel system; fuel deposit rate; gelatin

现代军用飞机使用涡轮喷气发动机, 其飞行 $Ma=1.5\sim 2.0$, 进气温度很高, 普遍采用燃油做吸热工质, 以冷却保护滑油系统、液压系统、电子系统等. 经冷却各系统后的燃油温度已达到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上. 这类发动机的增压比 $\pi_k \approx 25\sim 35$, 压气机出口温度很高, 将热燃油送进发动机至喷入燃烧室前, 燃油还要受到 $500\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的压气机出口高温气流的气动加热及燃烧室内 $1\,200\sim 1\,300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温火焰辐射加热. 此外, 燃油系统泵道加热、加力泵卸压加热也很大. 因此, 从喷嘴出口喷出前, 燃油温度往往达到 $150\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$. 在飞机飞行

中, 高空巡航时喷入发动机燃烧室的燃油量最少, 而进气温度及压气机出口温度最高, 造成燃油温度最高, 燃油热负荷非常严重. 在这样的高温条件下工作, 燃油中析出的胶质将沉积在燃油系统的油滤、调节器的阀门、油管及喷嘴等关键部件上, 造成堵塞以及燃油系统性能衰退, 发动机、飞机不能正常工作^[1-2].

本文建立实验台, 采用称重法研究了国产航空燃油 RP-3 在高热负荷下, 燃油的积沉率 (Deposit rate) 与温度的关系, 并直观地观察到油滤、离心喷嘴等关键部件上积沉物的特征.

1 实验系统

1.1 实验系统示意图

燃油积沉实验系统示意图见图 1.

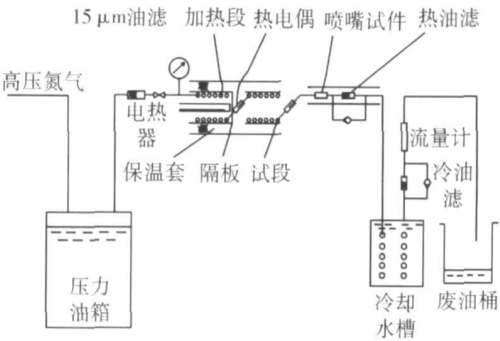


图 1 燃油积沉实验系统示意图
Fig. 1 Fuel deposit test sketch

压力油箱的 RP-3 燃油在高压氮气压缩下稳定地流入燃油管路, 首先流经 15 μm 的过滤器, 保证进口燃油的洁净. 加热段由约 3.9 m 长, $\Phi 2\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$ 的不锈钢管卷成 $\Phi 60\text{ mm}$ 的螺旋形. 螺管中间及外面设有电热器, 其功率为 2 kW, 对加热段的煤油加热. 其出口的管接头上装有测量油温及壁温的热电偶, 后面连接试段. 试段同样由长钢管卷成螺旋形, 在试段末端接头上也装有测温热电偶. 紧接试段装有喷嘴, 热油滤. 然后燃油在冷却水槽中冷至外界温度, 油管上再连一个冷油滤, 经流量计测量流量后收集到废油桶中. 试段做成螺旋形的考虑是因国外文献[3-5] 中报道的称重法多用长度为 150~ 170 mm 的小段直管做试段, 以便置于精密天平的隔离室中. 为了保证称重时对积沉增量测量准确, 增大钢管的内表面积而采用螺旋形, 可使其内表面积增至 86~ 98 cm^2 , 而国外短管的内表面积约为 10 cm^2 , 使积沉量的称重做得更准确些. 电热器用恒温控制器调节电流通断时间以维持壁温. 该控温仪为 XMT2001 型, 温控仪可自动补偿冷端温度, 在设定壁温 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时接通或切断电热器, 而油路系统中壁温变化幅度 $\leq \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. 设置试段是为了保持壁温. 试段及加热段外面有保护套. 经过几次实验, 对电热器插入长度, 加热段及试段保温套分离和设置中间隔板, 使试段进口壁温相等.

喷嘴采用美制 Stein 燃油炉用的单级离心喷嘴 1.25 型, 此喷嘴额定流量为 5 kg/h, 各部件便于拆卸, 其结构如图 2.

燃油系统上装有细不锈钢丝滤网, 其结构如图 3, 根据经线和纬线可算出过滤颗粒尺寸 $< 20\mu\text{m}$.

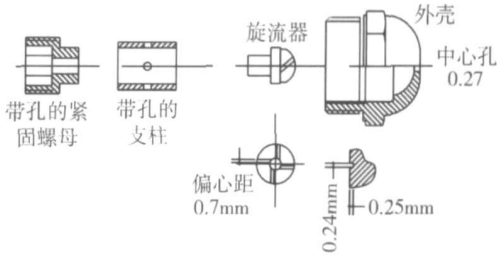


图 2 实验离心喷嘴结构图
Fig. 2 Construction of tested centrifugal nozzle

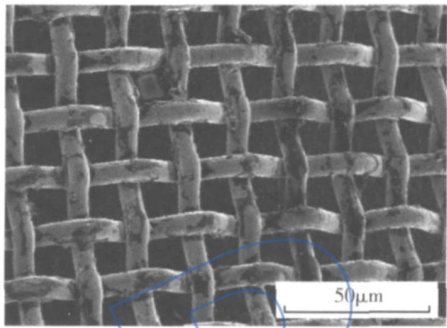


图 3 燃油系统油滤照片
Fig. 3 Fuel filter

1.2 实验参数

参照国外燃油积沉实验参数, 见表 1^[4-12]; 结合我们的条件, 选定实验参数及方法, 见表 2.

表 1 国外主燃油积沉实验参数

Table 1 Main fuel deposit test parameter of foreigner' s	
项目	数据
燃油流量/(mL/ min)	4~ 400
燃油流速/(m/ s)	0. 3~ 2. 65
实验油管外径×壁厚/ mm	$\Phi 3. 18 \times 0. 51/ \Phi 3. 2 \times 0. 5$
燃油温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	147~ 287
壁温范围/ $^{\circ}\text{C}$	177~ 477
燃油 Re	60~ 7 000
实验用油	JP 4, JP 5, Jet A, JP 8+ 添加剂
积沉率测定方法	称重法/ 积沉物燃烧气体分析

表 2 本实验参数及方法

Table 2 This deposit test parameter	
项目	数据
实验用油	RP 3
实验燃油温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	120~ 250
燃油流量/(L/ h)	3. 6~ 8. 5
燃油流速/(m/ s)	0. 5~ 1. 4
燃油 Re	870~ 2500
实验油管尺寸/ mm	$\Phi 2 \times 0. 2$
积沉率测定方法	称重法

1.3 实验方法

做积沉实验前, 先装好全部加热段、试段、接头及喷嘴、油滤等, 并检查在高压下有无渗漏. 实验表明全部接头采用球头- 锥面连接可以保证密封. 检查后的上述系统装上电热器、保温套. 调好实验油压, 一般为 0.7 MPa(因为国外实验表明在该压力以上, 压力不影响积沉实验结果). 调整燃油流量, 合上电热器开关, 设定温控器的壁温. 待壁温稳定后开始计时并记录油温、壁温、时间、气温等参数. 持续数小时后, 停止加热. 关上电热器, 即将温控器温度调到 0℃. 同时保持油量冷却加热段, 试段、喷嘴、油滤等, 待壁温降到 40℃ 以下即可停油及释放高压 N₂ 气. 一般冷却试件等需耗时 20 min 左右. 取下试段、加热段、喷嘴、油滤等. 吹净内部积油, 然后在 100~ 120℃ 的电炉上

烘干, 再吹净各段, 分解喷嘴各零件, 分别装上原标记. 送精密天平称量及 SEM 观察, 称量天平为德国 Sartorius analytic, 其称重上限 ≤50 g, 分辨率 0.000 1 g.

实验步骤: 按所列实验油量、油温, 先从较低油温、较小流量做起, 每次持续 3~ 8 h. 每次实验: (1) 实验前、后在精密天平上称量试件及油滤的重量; (2) 实验后在扫描电镜(SEM) 上观察记录喷嘴及油滤上的积沉;

2 实验结果及数据分析

2.1 RP-3 积沉率结果

积沉率按实验后比实验前试件增重可以算出积沉率(Deposit rate), 根据实验结果整理出管道油滤积沉率与油温、壁温的关系, 见表 3.

表 3 RP 3 的积沉率与油温, 壁温的关系
Table 3 Deposit rate of RP 3 vs. temperature

油温/℃	壁温/℃	时间/h	试管道积沉率/(μg/cm ² ·h)	热油滤积沉率/(μg/cm ² ·h)	冷油滤积沉率/(μg/cm ² ·h)
123	155	8	1.76	29.9	1.5
150	190	8	2.44	4.5	4.52
150	190	2.75	1.79	26.1	15.3
163	220	8	6.18	20.9	21.8
168	210	8	5.75	74.8	65.5
168	220	8	5.75	46.3	67
168	220	8	7.19	68.8	60.2
205	280	8	14.46	89.7	86.4
225	285	6	17.2	45.8	70.3
247	352	2.5	68.12	76.5	96.5

由表看出: 管道上的积沉率随温度上升而增加. 在油滤上的积沉率也是随温度的增加而增加. 在喷嘴, 由于积沉物附着的湿表面积很小, 经过几十小时的实验, 无法得出可测量的积沉量, 只能借助 SEM 观察其积沉的特征.

油管壁温 t_w 与燃油积沉率的关系见图 4. 图上也标出国外所作 JP-5 及引用的 JP-4, Jet A, JP-8 等燃料的数据^[6]. 国外称重法与燃烧分析法均采用, 前者直接测量实验前后重量变化, 简单可靠, 而后者通氧气燃烧积沉物, 通过分析气体成分求得积沉量. 本实验由于条件所限, 采用称重法测定积沉量. 从实验结果看出, 在一般情况下, RP-3 积沉率低于 JP-4, JP-5, Jet A, 高于 JP-8. 可能这是由于各种燃料的破点(Break Point)(它代表燃料热安全性的一个指标) 有差异^[2]. 见表 4.

表 4 燃油的破点

Table 4 Break point of jet fuels

燃料	JP-4	JP-5	Jet A	RP-3	JP-8
破点/℃	285	258	263	320	345

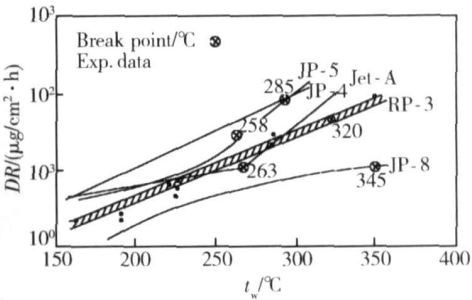


图 4 油管壁温 t_w 与积沉率的关系

Fig. 4 Deposit rate vs. wall temperature

2.2 油滤上的积沉

在油滤上的积沉见照片图 5, 这种积沉物为软质胶状物, 不易冲走. 它表明燃油调节器的精密表面、喷嘴内活门以及滑油换热器内油管表面上, 经长期工作后会附着严重的不均匀胶质, 严重时将会影响其正常工作, 使性能恶化.

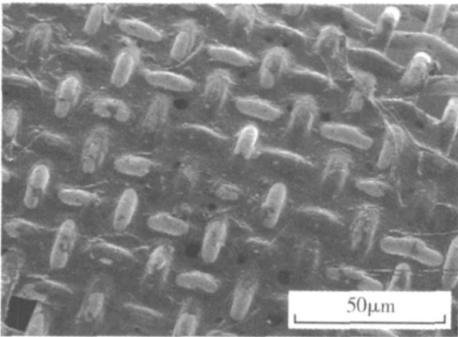


图 5 油滤上积沉的 SEM 照片
Fig. 5 Deposit on the fuel filter

2.3 喷嘴上的积沉

在 SEM 上观察, 发现喷嘴中心孔始终保持圆形, 没有积沉的迹象, 见图 6. 这可能有两个原因, 一是中心孔处燃油流速较高. 根据实验条件估

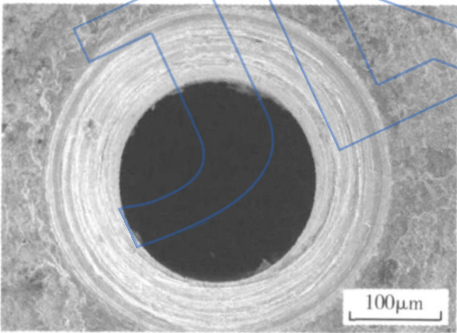


图 6 喷嘴中心孔照片
Fig. 6 Orifice of nozzle after test

算中心孔壁面燃油流速约为 20.5 m/s. 另一个原因是中心孔的圆柱面加工时容易保证其表面光洁度及均匀性, 因而不容易发生积沉物. 但是在离心喷嘴的切向槽上却观察到严重不均匀的积沉物, 见照片图 7. 这是由于槽道表面加工时, 不能保证做到槽道都能有连续的、均匀的、光洁的表面. 这点从喷嘴尚未做积沉实验前的槽道表面看出, 其内表面还有刀痕及对材料的撕裂的痕迹, 见图 8. 喷嘴槽道严重不均匀的积沉物对燃油的雾化有直接的影响, 使雾化性能恶化.

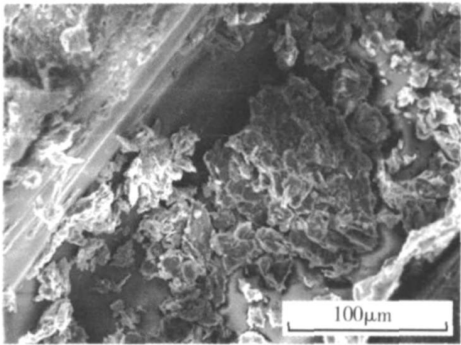


图 7 喷嘴切向槽内的积沉
Fig. 7 Deposit on tangential channel of nozzle swirler

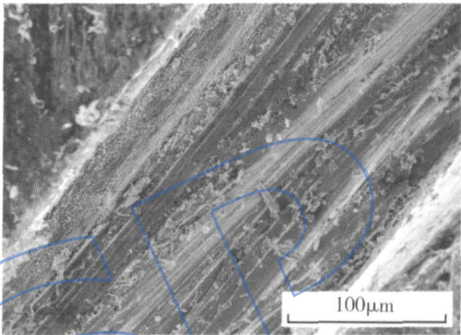


图 8 做积沉实验前的切向槽
Fig. 8 Tangential channel before test

3 结 论

本文采用称重法测定国产航空燃油 RP-3 在高温负荷下的积沉率与温度的关系, 方法简单, 数据可靠性高并且可直观地观察到燃油积沉现象, 结果表明:

- (1) 一般情况下, RP-3 积沉率低于美国 JP-4, JP-5, Jet A, 高于 JP-8;
- (2) 管道、油滤的积沉率与温度的关系表明, 积沉率随温度增加而增加. 油滤上的积沉表明: 在发动机长期工作后, 喷嘴的活门上可能有积沉, 它使该元件的性能衰退. 喷嘴的切向槽道上有严重不均匀的积沉, 它是造成喷嘴雾化性能恶化的直接根源.

参考文献:

[1] 刘济瀛. 中国喷气燃料[M]. 北京: 中国石化出版社, 1991 年 11 月.
[2] 黄乙武. 液体燃料的性质和应用[M]. 北京: 轻工业出版社, 1985 年 12 月.
[3] 德意志联邦共和国工程师协会, 工艺与化学工程学会编. 传热手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1983 年.
[4] Chin J S, Lefebvre A H, Sun F T Y. Temperature effects on fuel thermal stability [R]. ASME 91-GT-97, Feb 19,

1991.

[5] Chin J S, Lefebvre A H. Influence of flow conditions on deposits from heated hydrocarbon fuels[R] . ASME 92-GT-114, Feb6, 1992.

[6] Marteney P J, Spadaccini L J. Thermal decomposition of aircraft fuel [R]. ASME 86-GT-36, Jan8 1986.

[7] Coordinating Research Council, Inc. Thermal oxidation stability of jet fuels a literature survey[R]. CRC Report No. 509 Apr. 1979.

[8] Szetela E J, Giovanetti A J, Cohen S. Fuel deposit characteristics at low velocity[R]. ASME 85-IGT-130, June14, 1985.

[9] Heneghan S P, Martel C R, Williams T F, et al. Studies of jet fuel thermal stability in a flowing system[R]. ASME 92-GT-106, Feb6, 1992.

[10] Heneghan S P, Martel C R, Williams T F, et al. Effect of oxygen and additives on the thermal stability of jet fuels [R]. ASME 93-GT-130, March1, 1993.

[11] Daggett D L, Veninger A, Lewis C, et al. The development of an aviation fuel thermal stability test unit [R]. ASME 94-GT-217, March8, 1994.

[12] Jones E G, Balster W J, Post M E. Degradation of a jet-a fuel in a single pass heat exchanger[R]. ASME 93-GT-334, March 17, 1993.

