

# 3号喷气燃料加速老化实验中性能指标变化趋势研究

赵英<sup>1</sup>, 党晓勇<sup>1</sup>, 邹吉军<sup>2</sup>

(1. 北京动力机械研究所, 北京 100074; 2. 天津大学, 天津 300072)

**摘要:** 目的 研究作为导弹用涡轮发动机贮存寿命薄弱环节之一的油封燃料的贮存稳定性。方法 借鉴国外燃料加速老化试验方法, 开展不同状态燃料的加速老化实验。结果 掌握了3号喷气燃料加速老化实验中性能指标变化趋势, 评价了不同状态的3号喷气燃料的贮存稳定性。结论 脱水脱氧喷气燃料的贮存稳定性优于普通喷气燃料, 贮存16年后变质仍程度较低。

**关键词:** 燃气涡轮发动机; 燃料; 贮存性; 加速老化

**DOI:**10.7643/issn.1672-9242.2014.04.007

**中图分类号:** TG156.99 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2014)04-0032-05

## Research on Changes in Behavior Data of No. 3 Jet Fuel in Accelerated Aging Test

ZHAO Ying<sup>1</sup>, DANG Xiao-yong<sup>1</sup>, ZOU Ji-jun<sup>2</sup>

(1. Beijing Power Machinery Institute, Beijing 100074, China; 2. Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**ABSTRACT: Objective** To research the storage stability of oil-seal fuel, which is a key problem affecting the storage life of engines. **Methods** Referring to methods of fuel accelerated aging tests in foreign countries, the accelerated aging test of fuel under different conditions were performed. **Results** The results gave the changing trends of jet fuel No. 3 performance during the accelerated aging test, And the storage stability of Jet fuel No.3 at three different states were evaluated. **Conclusion** The storage stability of dehydrated and deoxygenated fuel was better than that of conventional fuel, with low metamorphic grade after 16 years of storage.

**KEY WORDS:** gas turbine engine; fuel; storage; accelerated aging

燃气涡轮发动机燃油系统中的燃油供给调节机构属于高精度控制机构,对燃油的清洁度要求极高。当燃油中的胶质、固体颗粒物超标,极易造成调节机构卡涩、运动不到位,导致发动机工作异常。燃料与燃油系统中活泼的金属接触,长期贮存后变

质会引起实际胶质和沉淀量超标,最终产生大量的固体颗粒物。因此,发动机燃油系统的油封工作十分重要,油封燃油的贮存稳定性直接关系到发动机的贮存寿命。

航空发动机燃油系统油封有专门的标准和规

收稿日期: 2014-06-24; 修订日期: 2014-07-01

Received : 2014-06-24; Revised : 2014-07-01

作者简介: 赵英(1975—),女,陕西商洛人,高级工程师,主要研究方向为航空发动机总体性能及贮存性。

**Biography:** ZHAO Ying(1975—), Female, from Shangluo, Shaanxi, Senior engineer, Research focus: overall performance of aero engines and engine storage.

范, GJB 1284《航空燃气涡轮发动机的封存包装》中规定航空发动机燃油系统采用8号润滑油填充, 启封时, 地面通燃油置换出润滑油, 油封期为3年<sup>[1]</sup>。若充满喷气燃料存放, 存放期最长不超过1个月。据了解, 燃油系统采用润滑油填充主要是避免活泼金属制造的精密偶件对燃油变质的催化作用。由于弹用涡轮发动机直接点火飞行, 无法实现航空发动机地面通油置换, 不能采用润滑油对燃油系统的封存, 只能采用以喷气燃料为主的油封介质封存。某型弹用发动机将普通喷气燃料经脱水脱氧处理(降低水含量和氧含量)后封存在燃油管路中, 以期改善其贮存性能<sup>[2]</sup>。

美国对于石油基碳氢燃料加速贮存试验方法有深入研究, 制订了 ASTM D-5304-06《采用氧过压评价中馏程燃油储存安定性的标准方法》<sup>[3]</sup>。该标准采用加速贮存试验方法评定燃油的贮存安定性, 适用对象为中馏分燃油。方法是: 在试验温度为90℃, 压力为800 kPa(纯氧)条件下, 测试试验油品中生成的不溶物。标准讨论了测试方法的等效性问题, 在温度影响方面, 40℃常压贮存1个月的油品中不溶物生成量与20℃常压贮存4个月油品基本一致; 压力影响方面, 从常压空气增加到800 kPa纯氧, 试验油品中不溶物生成量增加10倍。1995年, 美国海军实验室提出了《一种可靠实用的基于过氧化物生成评价航空涡轮机燃油长期贮存安定性的加速试验方法》<sup>[4]</sup>。该方法以航空煤油为研究对象, 设定试验温度为100℃, 实验操作与 ASTM D-5304-06基本相同。对6组不同来源的JP-5燃油进行了加速贮存试验, 测试油品的过氧化物含量。文中所列的高温(100℃)加速试验时间与评定的常温(20℃)贮存时间之间服从反应温度升高10℃, 反应速率提高1倍的规律, 即加速试验的温度系数为2。国产3号航空喷气燃料与美国JP-5航煤的组成和性质非常接近, 3号燃料属于石油基中馏分燃油, 与文献中的燃油本质一样, 属于碳氢燃油, 贮存过程中的氧化变质反应机理相同, 因此文献中的加速试验方法和温度系数可适用于国产3号航空喷气燃料。

为了掌握喷气燃料在燃油系统中的贮存变质情况, 借鉴美国石油基碳氢燃料加速贮存实验成果, 对国产喷气燃料开展了加速老化实验, 获得了普通燃料和脱水脱氧燃料贮存过程中各项性能指标的变化情况, 最终得出脱水脱氧燃料有利于改善发动机燃

油系统贮存稳定性<sup>[5-6]</sup>。

## 1 实验

### 1.1 方法

借鉴美国石油基碳氢燃料加速贮存实验成果: 在40~100℃范围内, 温度每升高10℃, 达到同样老化程度的时间减少一半, 即加速实验的温度系数为2<sup>[3-4]</sup>。通过检测对比燃料加速老化后的过氧化物浓度、酸值、胶质、固体颗粒物和运动黏度等性能指标, 获得喷气燃料的老化变质情况。

### 1.2 设备

由于燃料贮存过程中接触金属材料和非金属材料会受到一定程度的催化作用<sup>[7-8]</sup>, 因此, 加速老化试验模拟燃油装机状态, 采用不锈钢容器, 在容器中添加1枚铜片和2个橡胶圈, 如图1所示。



图1 加速老化实验使用的容器

Fig. 1 Containers used in accelerated aging tests

### 1.3 条件及对象

加速老化实验温度为90℃, 分别加速老化275, 550, 820, 1095, 1070, 1650 h(对应20℃下贮存4, 8, 12, 16, 20, 24年)。实验油样包括: 普通3号喷气燃料未装满, 装填率90%, 空气气氛; 普通3号喷气燃料装满, 装填率约100%; 脱水脱氧3号喷气燃料未装满, 装填率90%, 氮气气氛。

### 1.4 分析测试

对加速老化后油品的各项性能指标进行测试分析: 采用色谱-质谱(GC-MS)和红外光谱(FTIR)分析燃油的组分; 根据 GB/T 12574《喷气燃料总酸值测定法》测试燃油的酸性物质含量; 根据 SH/T 0176

《喷气燃料过氧化值测定法》测试燃油的过氧化物含量;根据 SH/T 0093《喷气燃料固体颗粒污染物测定法》测试燃油的颗粒物含量;根据 GB/T 8019《车用汽油和航空燃料实际胶质测定法》测试燃油中的胶质含量;根据 GB/T 3555《石油产品赛波特颜色测定法(赛波特比色计法)》测试燃油色度;根据 GB/T 265《石油产品运动粘度测定法和动力粘度计算法》测试燃油的粘度。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 外观

加速老化后的脱水脱氧喷气燃料和普通喷气燃料略带淡黄色,但保持清澈透明,未见固体不溶物和颗粒物,老化油样在过滤前后未见颜色变化。

### 2.2 组成变化

加速老化前后谱图基本相同,如图 2 所示。未见氧化物的特征峰,燃料组成未发生变化。

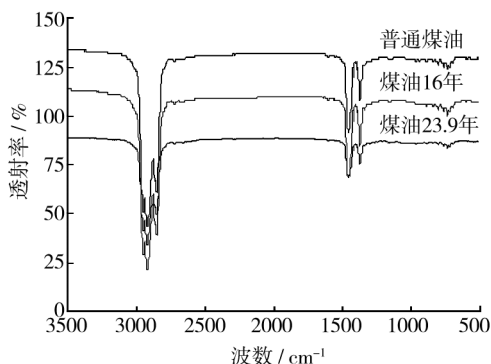


图2 喷气燃料加速老化前后的红外谱

Fig. 2 Infrared spectra of Jet fuel No. 3 before and after accelerated aging

### 2.3 过氧化值和酸值

加速老化过程中燃料的过氧化值和酸值变化曲线如图 3 所示。初始燃料不含过氧化物,酸值为 0.0056 mgKOH/g。老化初期(4 年)过氧化物的含量较高,其中普通喷气燃料未装满时最高达到 18 mg/kg,然后急剧降低,保持在 4 mg/kg 以下,满足美国 JP-5/JP-4 燃料标准中过氧化物浓度上限值 8 mg/kg 的规定<sup>[3]</sup>。燃料的酸值始终在 0.012

mgKOH/g 以下,满足 GB 6537—2006《3 号喷气燃料》规定的上限值 0.015 mgKOH/g<sup>[9]</sup>。

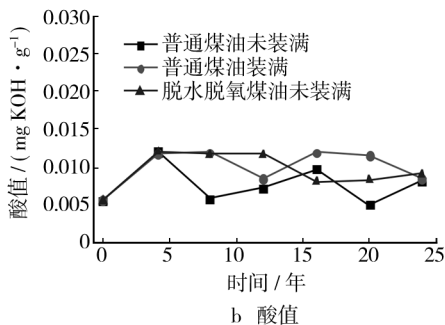
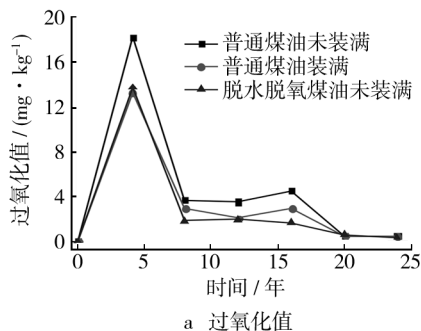


图3 加速老化过程中燃料的过氧化值和酸值

Fig. 3 Values of peroxidation and acidity of fuel during accelerated aging

实验初始阶段,燃料的过氧化值和酸值均有明显的增加,之后缓慢下降维持在一水平,说明燃料老化初期反应产物为过氧化物和酸类,符合自由基反应机理。比较脱水脱氧燃料与普通 3 号喷气燃料的加速老化数据,脱水脱氧燃料的过氧化值和酸值均低于或等于普通燃料,说明脱氧脱水燃料老化变质程度低于普通燃料。

### 2.4 黏度

加速老化过程中,燃料在 20 ℃ 和 -40 ℃ 下的运动粘度保持恒定,与初始燃料基本相同,满足 3 号喷气燃料的标准要求,说明加速老化后燃料的输送性能未发生变化。

### 2.5 胶质和颗粒物

加速老化过程中燃料的胶质和固体颗粒物含量变化曲线如图 4 所示。初始燃料不含胶质,加速老化 23.9 年的胶质含量最高为 6.4 mg/100 mL,满足 GB 6537—2006 规定的上限值 7 mg/100 mL<sup>[9]</sup>,其

中,脱水脱氧燃料的胶质含量最低。

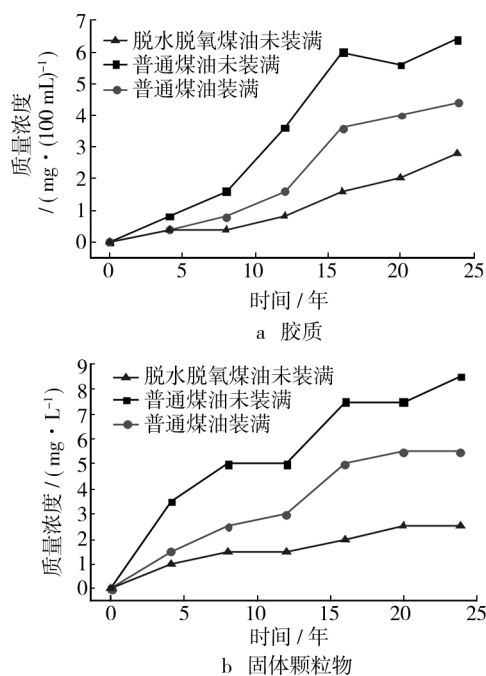


图4 加速老化过程中燃料的胶质和固体颗粒物含量

Fig. 4 Contents of gelatinous materials and solid particles in fuel during accelerated aging

初始燃料不含固体颗粒物,加速老化4.1年时,脱水脱氧燃料的固体颗粒物的质量浓度为1 mg/L,满足GB 6537—2006规定的上限值1 mg/L<sup>[9]</sup>。随着加速老化时间的增加,固体颗粒物的含量缓慢增加,加速老化8年时为1.5 mg/L,加速老化16年时为2 mg/L,23.9年时达到2.5 mg/L。普通喷气燃料产生的固体颗粒物较多,加速老化4.1年时固体颗粒物的质量浓度超过1.5 mg/L,加速老化16年时超过5 mg/L。

实验初始阶段,燃料的固体颗粒物和胶质含量增加较为缓慢,一定时间后,固体颗粒物和胶质含量有大幅增加,说明燃料老化后期反应产物为固体颗粒物和胶质<sup>[10]</sup>。从燃料加速老化实验中各参数的变化规律可以看出,燃料的老化变质过程基本符合以下机理过程:烃分子→过氧化物→醇、酮→酸→酯→胶质(固体颗粒物)<sup>[11-14]</sup>。老化试验中模拟了真实贮存环境中的接触介质,对燃料的老化起到了催化作用,老化产物主要是燃料变质产物。由于接触介质含量较少,其老化产物可以忽略不计。

## 2.6 颗粒物粒径

在加速老化过程中,脱水脱氧燃料中生成的颗粒物粒径变化不大,始终小于1 μm。未装满的普通喷气燃料出现了部分粒径大于1 μm的颗粒物,20年时出现少量4 μm的颗粒物。装满的普通喷气燃料老化20年时,出现了较多5 μm的颗粒物,在实验罐底部出现了明显的结垢,是较大颗粒物沉积生成的。

## 3 结论

三种状态下的加速老化实验结果表明:3号喷气燃料脱水脱氧喷气燃料未装满贮存稳定性优于普通喷气燃料装满,更优于普通喷气燃料未装满。脱水脱氧喷气燃料老化后发生一定程度变质,除颗粒物含量指标外,其他指标变化不明显,仍在标准值范围内。加速老化8年时,颗粒物含量指标超过标准规定值的0.5倍;加速老化16年时,颗粒物含量指标超过标准规定值的1倍。通过检测颗粒物粒径,燃料变质后的颗粒物粒径仍较小(小于1 μm)。

## 参考文献:

- [1] GJB 1284—91,航空燃气涡轮发动机的封存包装[S]. GJB 1284—91, Engines, Aircraft, Gas Turbine, Preservation and Packaging [S].
- [2] 南国枝,范维玉,李水平,等.微量水分对喷气燃料中悬浮物形成的影响[J].中国石油大学学报,2007,30(2):139—142.  
NAN Guo-zhi, FAN Wei-yu, LI Shui-ping, et al. Influence of Trace Water on Formation of Suspended Matter in Jet Fuel[J]. Journal of China University of Petroleum, 2007, 30(2):139—142.
- [3] ASTM D-5304-06, Standard Test Method for Assessing Middle Distillate Fuel Storage Stability by Oxygen Overpressure [S].
- [4] PANDE G S, BLACK H B, HARDY R D. A Reliable and Practical Accelerated Test Method for Predicting the Long-term Storage Stabilities of Aviation Turbine Fuels Based on Hydroperoxide Formation [J]. Energy Fuels, 1995(9):183—187.
- [5] 米镇涛,周震寰,张香文,等.合成高密度燃料的氧化安定性及贮存寿命预测[J].推进技术,2001,22(6):

514—517.

MI Zhen-tao, ZHOU Zhen-huan, ZHANG Xiang-wen, et al. Oxidative Stability of Synthetic High Energy Density Fuel and Storage Life Prediction[J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(6): 514—517.

[6] 范启明, 米镇涛, 张香文, 等. 提高航空燃料热安定性的研究进展[J]. 石化技术与应用, 2002, 20(4): 261—263.

FAN Qi-ming, MI Zhen-tao, ZHANG Xiang-wen, et al. Researching Progress of Improving the Heat Stability of Jet Fuel[J]. Petrochemical Industry Application, 2002, 20(4): 261—263.

[7] 古玲, 张香文, 米镇涛. 金属对高密度喷气燃料的催化氧化作用[J]. 大同职业技术学院学报, 2005, 19(2): 71—73.

GU Ling, ZHANG Xiang-wen, MI Zhen-tao. The Catalytic Activity of Metals on Oxidation of High-Density Jet Fuels [J]. Journal of Datong Vocational College, 2005, 19(2): 71—73.

[8] 张香文, 米镇涛, 周震寰, 等. 高能量密度燃料 HDF-1 与金属材料的相容性[J]. 推进技术, 2002, 23(3): 161—163.

ZHANG Xiang-wen, MI Zhen-tao, ZHOU Zhen-huan, et al. Compatibility of High Energy Density Fuel (HDF-1) and Metal Material[J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 23(3): 161—163.

[9] GB 6537—2006, 3 号喷气燃料[S].

GB 6537—2006, No. 3 Jet Fuel[S].

[10] 王红, 张颖, 陈立波. 喷气燃料中胶质化合物的质谱分析[J]. 分析测试学报, 2007(9): 314—316.

WANG Hong, ZHANG Ying, CHEN Li-bo. Analysis of Gum Compound in Jet Fuel by Mass Spectrometry[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2007, 9: 314—316.

[11] 梁文杰, 阙国和, 刘晨光, 等. 石油化学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2009.

LIANG Wen-jie, QUE Guo-he, LIU Chen-guang, et al. Petroleum Chemistry[M]. Dongying: China University Petroleum Press, 2009.

[12] 许世海, 熊云, 刘晓. 液体燃料的性质及应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2010.

XU Shi-hai, XIONG Yun, LIU Xiao. The Properties and Applications of Liquid Fuels[M]. Beijing: Sinopec Press, 2010.

[13] 刘济瀛. 中国喷气燃料[M]. 北京: 中国石化出版社, 1991.

LIU Ji-ying. Jet Fuel of China [M]. Beijing: Sinopec Press, 1991.

[14] 王世光. 改善弹用涡轮发动机喷气燃料低温性和贮存性的措施研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 94—98.

WANG Shi-guang. Research on Improvement of Low Temperature Behavior and Storage Capability of Jet Fuels for Turbine Engines [J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3): 94—98.

(上接第 31 页)

[13] JUNGIN K, WOO Il L, STEPHEN W T. Modeling of Mechanical Property Degradation by Short-term Aging at High Temperatures[J]. Composites: Part B, 2002(33): 531—543.

[14] DUSAN K, ANTONIO R. Thermodynamics and Statistical Physics of Damage Processes in Quasi-ductile Solids[J]. Mechanics of Materials, 2005(37): 299—315.

[15] VALANIS K C, PENG S T J. Deformation Kinetics of Ageing Materials[J]. Polymer, 1983, 24: 1551—1557.

[16] 封先河. 蠕变动力学模型及其在弹簧蠕变中的应用[J]. 科学通报, 2012, 57(25): 2354—2358.

FENG Xian-he. Creep Dynamic Model and Its Application to the Creep of Spring [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(25): 2354—2358.

[17] 封先河, 魏小琴. 压缩橡胶密封圈蠕变/老化行为研究[J]. 中国科学: 物理学、力学、天文学, 2014, 44(5): 486—491.

FENG Xian-he, WEI Xiao-qin. Creep/Aging Behavior Study of Compressed Fluorinated Silicone Rubber Oring [J]. Scientia Sinica (Physica Mechanica & Astronomica), 2014, 44(5): 486—491.

[18] 汪志诚. 热力学统计物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1980.

WANG Zhi-cheng. Thermodynamics Statistics Physics [M]. Beijing: Higher Education Publisher, 1980.

[19] 任永泰, 史希福. 常微分方程[M]. 沈阳: 辽宁人民出版社, 1984.

REN Yun-tai, SHI Xi-fu. Ordinary Differential Equation [M]. Shenyang: People's Publisher in Liaoning, 1984.