

# 喷气燃料热安定性对飞机发动机的影响

Effects of the Heat Stability of the Jet Fuel on the Aeroengine

空军油料研究所 张冬梅 张怀安 曹文杰 沈虹滨

[摘要] 探讨了喷气燃料热安定性对飞机发动机的影响, 及提高燃料热安定性的方法。

关键词: HiReTS 热安定性 沉积物

[ABSTRACT] The effects of the heat stability of the jet fuel on the airplane engine and the method improving the thermal oxidization stability of the jet fuel are discussed.

Keywords: High Renault thermal stability Thermal stability Deposit

热安定性是喷气燃料的一个重要使用性能, 飞机在超音速飞行时, 油箱会产生气动加温, 喷气燃料温度较高。另外, 用喷气燃料对滑油散热器冷却时, 喷气燃料温度会进一步增高。在高温和空气中氧的作用下, 喷气燃料会发生化学变化(包括氧化、热分解、聚合等), 生成固态不溶解沉淀物, 不溶解沉淀物会影响热交换器效能, 堵塞飞机燃料系统的喷嘴、管路、过滤器、注射泵等部件, 给飞行安全带来极大隐患, 严重影响飞机的总体性能。这些对于超音速飞机显得尤为重要, 由于空气动力的解热作用, 使飞机发动机燃料系统经常处在较高的温度环境下工作。

本文简要介绍了喷气燃料的热安定性对飞机发动机的影响, 探讨了提高喷气燃料热安定性的途径。

## 1 喷气燃料的热安定性及其评定方法

所谓“喷气燃料高温热安定性”就是指在高温下喷气燃料生成固体不溶解沉积物的倾向。研究喷气燃料的热安定性, 实质上就是研究喷气燃料在航空发动机燃料系统内由于受热而产生沉积物的趋势。

目前, 传统检测喷气燃料热安定性的方法分为静态法和动态法。静态法使燃料样品在一个隔离的容器内氧化, 然后测定生成的沉淀物的重量和溶解的及不溶解的胶质。动态法首先将燃料加热, 然后测定燃料中产生的堵塞在油滤上的胶体化合物和在受热表面上生成的沉淀物。与静态法相比, 动态法能在更大程度上再现燃料在飞机燃料系统内存在的条件。

动态热安定性的基本思路(方法)是: 通过模拟航

空发动机燃油系统的工作状态(参见图1), 将燃料试样按规定流量送入系统, 经过加热系统(模拟发动机燃料或滑油冷却器)加热, 进入一个热的燃油细通道(代表发动机部件内燃料喷嘴和小的燃油通道)。在试验中利用各种方法捕集试验过程中试样变质生成的产物。变质产物沉积的程度可以用过滤器前后压差表示, 也可以用管壁温度的提升程度以及加热器内管表面沉积物的颜色级别等作为在实验温度下评定喷气燃料热安定性的判据。

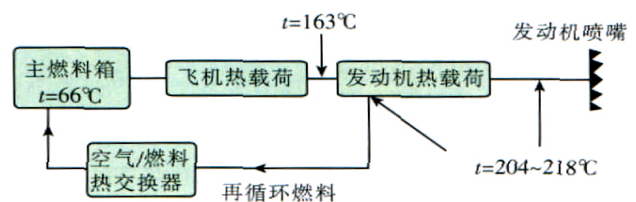


图1 第四代发动机燃油系统示意图

Fig.1 Fuel system of the fourth-generation engine

目前, 经常采用的评定喷气燃料热安定性的试验方法有:

(1) ASTM D3241-01 (GB/T 9169) “喷气燃料热氧化安定性试验法”, 简称 JFTOT 试验法。该方法模拟燃料在发动机燃油系统中处于层流状态下的热动力学状态。

(2) ASTM D6811-02 “高雷诺数热氧化安定性试验法”, 简称 HiReTS 试验法。该方法模拟燃料在发动机燃油系统中处于湍流状态下的热动力学状态。

(3) 俄罗斯综合鉴定法, 简称 -2 试验法。“采用 -2 机在动态条件下测定不同温度段喷气燃料热氧化安定性”, 该方法模拟燃料在发动机燃油系统中处于层流状态下的热动力学状态。

这3种方法各有优缺点。JFTOT 试验法只能定性, 不能定量。-2 试验法试验温度较低(200 左右), 没有 JFTOT 试验法温度高(260 ), 而且仪器操作复杂, 自动化程度低。HiReTS 试验法能定性和定量地分析热氧化安定性。

## 2 喷气燃料热安定性对飞机性能的影响

喷气燃料不仅作为飞机前进的动力源,而且还作为飞机各类热交换器的冷却源发挥作用。因此,对工作温度表现出的热安定性是喷气燃料的一项重要性能,对飞机和发动机的工作可靠性、飞机飞行安全及技战术性能的发挥产生很大的影响。有资料表明<sup>[1-2]</sup>,与燃料质量有关的飞机-发动机故障中,约有一半可能与燃料的热氧化安定性有关(参见表 1)。

其中,颇具代表性而又容易发生的一些情况包括:燃料热氧化产物沉积导致燃油总管与喷嘴之间的压差超标;燃料系统铜质活门上产生了黑色氧化沉积物而导致活门工作故障;燃油-滑油散热器的换热表面上产生胶质沉积物影响散热器工散效率,导致润滑油出口温度过高;氧化产物颗粒堵塞油滤等问题。因此,提高喷气燃料热安定性研究是一项具有重大现实意义的工作。

喷气燃料热安定性的提高能够显著减缓在发动机燃料系统的热表面上燃料的降解和形成沉积物、漆膜以及结焦的趋势,通过保持燃料喷嘴的清洁和避免结焦,可以更有效地提升燃烧效率,从而减少燃烧室和加力燃烧室内的结焦沉积和承受的热应力。

## 3 国内外提高喷气燃料热安定性的研究

近几年,随着超音速和超高音速飞机计划的出台,未来飞机发动机的工作条件将更为苛刻,对燃料的热安定性要求也更为严格。一方面,发动机工作温度提高,燃料要

承受更高的热负荷。另一方面,飞机热负荷增加后,原可作为冷却物质的空气,此时已成为热负荷增加的原因之一,使燃料成为唯一热吸收源并承受更高热负荷的物质,这种高热负荷是 JP-8 及其他热安定性燃料难以承受的。因此,空军于 1989 年提出了一项旨在提高燃料热安定性的计划。他们提出了两种研究计划,一是研制一种新的具有更高热安定性的燃料,但考虑到推出一种新型燃料的费用昂贵,而且在战争中会增加后勤负担。因此,采用第二个方案,也就是研制一种改善热安定性的添加剂包,同时为研制全新的燃料打下理论基础。这种添加剂包加入到煤油基 JP-8 中,可

表 1 飞机发动机故障与燃料热安定性可能存在的关系

故障特征	故障原因	可能相关的燃料性质
飞行中发动机自动停车	恒压差活门滞涩,柱塞油泵有故障;返还联动分流活门衬套向调节器外壳偏移;燃油工作喷嘴端面面积炭太多	燃料的热氧化安定性、抗磨性和洁净度不好;液相腐蚀性和生炭性大;有冰晶析出堵塞油滤和油路
发动机停车后涡轮惯性下降	由涡轮轴带动的部件摩擦增大;涡轮轴承不灵活,润滑不良	燃料的润滑性不好;热氧化安定性差
燃烧室火焰筒严重烧伤及涡轮导向器叶片烧坏	工作喷嘴积炭多,喷嘴中油滤结炭,喷雾恶化,分布不匀	燃料生炭性大,热氧化安定性不好
发动机热启动不稳定和启动失败	喷嘴喷雾不良;点火电嘴工作不良,电极间有炭桥;自动启动活门工作有故障,加速活门滞涩	燃料生炭性高,热氧化安定性、润滑和抗磨性不好,洁净度差
加速时间增长,发动机产生爆音	定压分流活门滞涩;减速器油嘴和转速限制器油嘴堵塞	燃料中有机械杂质,热氧化安定性不好
接通加力后发动机产生不了所要求达到的推力	加力燃油系统燃油喷嘴堵塞	燃料的热氧化安定性不好
燃油系统橡胶密封件漏油,橡胶油管漏油	橡胶件老化;橡胶件膨胀不足	燃料安定性不好;生成过氧化物侵蚀橡胶;燃料中芳烃含量过低
燃油总管破裂	燃油喷嘴中过滤器堵塞引起压力增大胀破	燃料的洁净性和热氧化安定性不好
发动机启动超温	燃油喷嘴油滤堵塞	燃料的洁净性和热氧化安定性不好

将热安定性提高 55 (100)。这个计划被称为 JP-8+100 计划。美国经过大量添加剂及其组合试验, 终于研究出了一种理想的添加包, 并于 1994 年在军队试用, 试用相当成功。使用 JP-8+100 燃料的飞机无故障工作时间增加了 3 倍, 提高了飞行出勤率, 减少了飞行事故, 发动机系统结焦问题大大减少。几个月的试用表明节约发动机维修费用 264 美元/飞行小时, 1 年可节约 8000 万美元左右。所以, 美空军在 1998 年前对全球范围内的美空军 F-15 和 F-16 基地均换用 JP-8+100 燃料。JP-8+100 喷气燃料在 F-16 和 F-15 飞机上使用结果表明, 它具有极大的军事和经济效益<sup>[9]</sup>: 可延长飞机无故障工作时间 340%, 提高飞行出勤率 3%, 减少架次故障 1%, 节约人力维修时间近 73%, 减少污垢近 90%, 减少结焦近 50%。还明显减少了燃料在发动机燃料控制装置、主燃烧室喷嘴、管线及加力燃烧室喷雾器/喷雾滤网沉积物和积碳, 对老式发动机而言, 还减少了烟尘和烟垢。

JP-8+100 添加剂包不仅具有上述优良性能, 而且经济效益很好, 每加仑油料最低仅需花费 4~5 美分即可, 并且由于减少了维护时间、日常费用和由于维护时间原因导致的不可飞行时间, 大大节省了开支。目前, 该燃料已作为标准燃料在多种军用飞机上普遍使用。

作为美军于 1992 年制定并开始执行的“先进燃料研究计划”的一部分, JP-900 这种新研发的吸热燃料高热安定性达到了 482。据称各项性能指标符合和超过 JP-8 要求。使用这种燃料可取消发动机再循环燃料系统。据报道, 美国空军与美国宾西法尼亚州能源研究所合作, 研制出的 JP-900, 是一种以煤为原料的高热安定性燃料。该燃料可在 482 的高温下长时间保持稳定而不发生分解。

我国针对喷气燃料热氧化性的研究早期侧重于通过改善炼制工艺来提高热氧化安定性, 对燃料添加剂的研究不够深入。不过目前这种局面已得到改善, 某研究所正在研制的添加剂包在提高喷气燃料热安定性方面取得了较大成绩。

第四代战机的研制和应用对新型热安定性喷气燃料添加剂的研究已成为一种必然。

#### 4 结论

热安定性是喷气燃料的一项重要使用指标, 热安定性对飞机和发动机的工作可靠性、飞机飞行安全及技战术性能的发挥产生很大的影响。因此, 加强对热

安定性的研究对提高航空发动机的使用可靠性和飞机的飞行安全具有十分重要的意义。

#### 参 考 文 献

- [1] 刘济瀛. 中国喷气燃料. 北京: 中国石化出版社, 1991.
- [2] 黎文济, 张智勇. 未来美国军用航空油料发展概论. 北京: 国防工业出版社, 1992.
- [3] Ed Owen, Ed Frame. Implications of JP8+100 for army aviation and ground forces. Fuel Line, 1999, 2: 35-37.

(责编 金卯)

(上接第 83 页)

- [7] 吕学勤, 杨尚磊, 吴毅. 铝合金与不锈钢的过渡层钎焊. 焊接学报, 2006, 25(1): 95-99.
- [8] 何鹏, 冯吉才, 钱乙余. 接触反应法解决铝/不锈钢钎焊的缺陷及脆性. 材料科学与工艺, 2005, 13(13): 82-85.
- [9] 傅莉, 毛信孚, 史学芳. LF6 防锈铝与 HR-2 抗氢不锈钢摩擦焊接. 焊接学报, 2003, 24(1): 9-13.
- [10] 张田仓, 栾国红, 陈沁刚, 等. 纯铝-不锈钢异种材料惯性摩擦焊的研究. 新工艺 新技术 新设备, 1998(3): 33-36.
- [11] Huseyin Uzun, Claudio Dalle Donne, Alberto Argagnotto, et al. Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 ToX5CrNi18-10 stainless steel. Materials and Design, 2005(26): 41-46.
- [12] Fukumoto S, Tsubakino H, Okita K, et al. Amorphization by friction welding between 5052 aluminum alloy and 304 stainless steel. Scripta Materialia, 2000, 42(8): 807-812.
- [13] 李红, 韩静涛. 不锈钢-铝蜂窝夹芯板的液相扩散连接. 北京科技大学学报, 2006, 28(2): 138-143.
- [14] 王宝云, 马东康, 李争显, 等. 内爆炸法制备铝/不锈钢细长双金属复合管的研究. 焊接, 2005(9): 54-57.
- [15] 王宝云, 马东康, 李争显. 爆炸焊接铝/不锈钢薄壁复合管界面的微观分析. 稀有金属快报, 2006, 25(2): 26-30.
- [16] Jirromaru Tsujino, Kazuaki Hidai, Atsushi Hasegawa. Ultrasonic butt welding of aluminum, aluminum alloy and stainless steel plate specimens. Ultrasonics, 2002(40): 371-374.
- [17] Matsugi K, Wang Y, Hatayama, et al. Application of electric discharge in joining aluminum and stainless steel sheet. Journal of Materials Processing Technology, 135(2003): 75-82.
- [18] Liu Yang, Hosoda Naoe, Suga Tadatama. TEM investigation of the stainless steel/aluminum interface created by the surface activated bonding method. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1997, 121: 519-523.

(责编 晓霏)