

涡轮发动机喷气燃料低温性和贮存性改善研究

王世光

(海装天津局, 天津 300072)

摘要: 导弹用涡轮发动机采用的喷气燃料要求具有良好的耐低温性能和贮存性能。文中介绍了工程应用领域中通过对普通燃料脱水、脱氧精制成的一种低温性和贮存性都较优的油封燃料, 该项措施在国内相关领域具有一定的创新性。

关键词: 涡轮发动机; 喷气燃料; 低温性; 贮存性

中图分类号: V231; V235.1 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)02-0094-05

Research on Improvement of Low Temperature Behavior and Storage Capability of Jet Fuels for Turbine Engines

WANG Shi-guang

(Tianjin Bureau of China Naval Equipment Ministry, Tianjin 300072, China)

Abstract: Good low temperature performance and storage capability are required for jet fuels used in missile-used turbine engines. A kind of oil-seal fuel that has strong resistance to low temperature and excellent storage capability was introduced, which was prepared form dehydration and deoxygenation of common fuel in engineering field. The innovation of the method was introduced.

Key words: turbine engine; jet fuel; low temperature behavior; storage capability

导弹用涡轮发动机具有长期贮存、一次性使用、工作寿命短、使用工况苛刻等特点。弹用涡轮发动机使用3号喷气燃料,在发动机出厂时发动机燃油控制系统及管路中封存一部分燃料,以保证发动机的点火可靠性。3号喷气燃料的低温环境适应性和长期贮存性成为制约其使用寿命的关键因素之一。

喷气燃料经过脱水脱氧精制后封存在发动机燃

油系统中,可以保证燃料具有良好的耐低温性能和长期贮存稳定性。为此,开展了喷气燃料脱水脱氧精制处理的相关技术和工艺研究。

1 溶解氧和水对喷气燃料性能的影响机理

喷气燃料中的水主要以两种形式存在:一种是

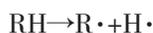
收稿日期: 2011-11-30

作者简介: 王世光(1973—),男,河北定州人,工程师,主要研究方向装备环境适应性。

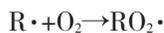
以游离态的形式存在,一种是以溶解水的形式存在^[1]。游离水容易用沉降、底排放等方法除去,溶解水则不易除去。燃料中的氧主要以溶解氧的形式存在,随着温度升高,氧的溶解度也越大。

1.1 溶解氧对喷气燃料性能影响的机理

溶解氧是影响燃料安定性的主要因素。氧的存在使烃类燃料氧化,其过程按照自由基反应机理进行:

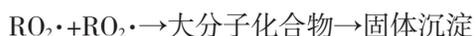


烃自由基在低温下生成速率缓慢,但生成的自由基 $R \cdot$ 会继续与溶解氧结合,生成烃的过氧化物自由基:



与自由基 $R \cdot$ 的生成速率相比,过氧化物自由基 $RO_2 \cdot$ 的生成速率非常快。当自由基 $R \cdot$ 引发反应后,更为活泼的过氧化物自由基 $RO_2 \cdot$ 便作为链反应的主要传递着,维持着反应进行。

过氧化物自由基 $RO_2 \cdot$ 浓度继续增大则会发生链终止反应:



与此同时,过氧化物自由基还可以发生若干其它类型的反应,如歧化、分解、异构化等,最终生成醇、醚、有机酸等复杂产物,从而导致燃料变质。

1.2 溶解水对喷气燃料性能影响的机理

水随着环境温度的降低溶解度也随之降低,部分溶解水析出成为游离水,在低温下形成冰晶,对燃料的低温输送性能造成影响。溶解水还能促进燃料的氧化变质,其主要原因是水分能将燃料中添加的抗氧化剂和天然抗氧化物质抽提出来,加快了燃料氧化变质的速率,从而影响燃料的贮存安定性。燃料中水分的存在还是形成悬浮物的重要因素之一,水分给微生物或细菌提供生存环境,微生物或细菌异常繁殖会给燃料供给带来隐患,经研究,喷气燃料中的水分控制到0.21%(质量分数)以下时能抑制悬浮物的生成^[2]。

因此,为了使燃料具有良好的低温性能,保证燃料的低温输送性能和长期贮存稳定性,对燃料进行脱水脱氧精制是非常必要的。

2 提高喷气燃料贮存安定性途径分析

影响燃料贮存安定性的因素有两方面:1)燃料自身的化学组成,喷气燃料主要由饱和烷烃和环烷烃组成,也含有一定的不饱和烃,不饱和烃的稳定性较差,燃料中含有的硫、氧、氮的化合物能促进沉积物的生成;2)燃料中溶解水和氧加速燃料的氧化。

常用的提高喷气燃料质量的方法有以下几种。

1) 加氢精制。在适当的温度压力下,氢气与喷气燃料中的非烃化合物反应,生成 H_2O , H_2S , NH_3 脱出;不饱和烃和部分芳烃、萘系烃与氢气反应达到饱和。加氢精制的喷气燃料质量比较好,但其贮存安定性、橡胶相容性和抗磨性不好。

2) 添加抗氧化剂。添加抗氧化剂是最有效、最简单的措施,抗氧化剂可以改变自由基反应历程,抑制或中止自由基的生成或增长,从而提高燃料的安定性。多数3号喷气燃料出厂时添加了抗氧化剂。

3) 脱除燃料中的溶解氧和水。3号喷气燃料出厂时尽管添加了抗氧化剂,但是由于溶解氧和水的存在,仍会对燃料的贮存稳定性产生影响。

对于需要长期贮存的弹用发动机喷气燃料,虽然已经添加了抗氧化剂,但仍需要采取脱水脱氧的方法,将燃料中对贮存安定性有害的物质尽量去除干净。

3 影响喷气燃料中氧和水的溶解度的因素

3.1 影响水的溶解度的因素

燃料出厂时,游离水质量分数不大于0.30%。对于封闭环境下,燃料中游离水和溶解水处于动态平衡,随着温度和压力的变化,两种状态会互相转化。随着温度或压力升高,游离水会转化为溶解水,反之亦然。水在燃料中的溶解度服从亨利定律^[3],在给定条件下,知道压力 P_0 、温度 T_0 、100%相对湿度下的溶解度 g_0 ,可以按照式(1)计算其它压力 P 、温度 T 和相对湿度 ψ 对应的溶解度 g 。

$$g = g_0 \cdot \psi \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \quad (1)$$

式中: n 为与燃料性质有关的指数。

由式(1)可知,当空气的压力、温度和湿度降低时,燃料中水的溶解度也降低。

3.2 影响氧的溶解度的因素

燃料中所含溶解气体(包括空气、氧气、氮气等)与燃料上部的气体呈平衡状态,利用亨利定律可以计算出压力对气体溶解度的影响。

$$Q = \rho B \frac{P}{P_0} \quad (2)$$

式中: Q 为气体在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和压力 P 下的溶解度; ρ 为气体在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和标准大气压下的密度; P 为燃料上层空间中溶解的气体的分压; P_0 为常压,101 325 Pa; B 为本生系数^[3]。

可见,当燃料上层空间中氧气的分压趋于0时,燃料中溶解的氧气也趋于0。

4 喷气燃料脱水脱氧工艺研究

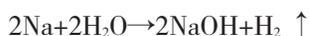
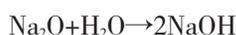
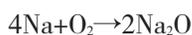
喷气燃料脱水脱氧的方法有物理脱氧法和化学脱氧法^[4],分别对两种脱水脱氧方法进行工程化研究。

4.1 化学法

20世纪90年代中期,由于国内没有对喷气燃料进行脱氧脱水的经验,经过实验摸索,最终确定了一套化学处理方法来实现燃料的脱氧脱水。

4.1.1 工艺原理

采用化学反应除去燃料中溶解的水和氧,反应方程式如下:



4.1.2 工艺流程

喷气燃料脱水脱氧工艺流程如图1所示。



图1 3号喷气燃料化学法脱水脱氧工艺流程示意

Fig. 1 Process flow chart of dehydration and deoxidation of jet fuel No.3

4.1.3 工艺特点

用金属钠丝除去溶解水和氧的同时,对燃料中的各种添加剂也有所消耗,为了保证燃料的贮存性能,精馏后的燃料中又添加了抗氧剂,其他添加剂未补充。对于金属钠丝反应后的生成物,通过过滤和精馏除去。从检测数据可以看出,燃料仍呈微弱的酸性,金属钠的残留为0。燃料的酸值测试结果满足技术指标要求,见表1。

表1 燃料的酸值测试结果

Table 1 Test result of fuel acid value

试样名称	总酸值(以KOH计)/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	标准及方法
3号喷气燃料	≤ 0.015	
小试产品	0.004 6	GB/T 12574
工程化产品	0.004 2	

酸值的降低对于长期贮存有利。添加的抗氧剂为T501(2,6-二叔丁基对甲酚),用量为20 mg/kg,与3号喷气燃料出厂时的添加量一致。

4.1.4 存在的问题

金属钠与溶解的水和氧反应时,对燃料中的各种添加剂也有所消耗,由于技术条件中未对抗磨性和导电性进行要求,所以精馏后的燃料中未添加抗磨剂和抗静电剂,只是考虑燃料的长期贮存性能,补充了抗氧剂。

4.2 物理法

根据对喷气燃料中影响氧和水的溶解度的因素的介绍,当把燃料容器中的空气用惰性气体置换后,燃料中溶解的氧和水的质量分数理论上可降至0。利用这一理论,可通过氮气吹扫,实现燃料脱水脱氧。

4.2.1 吹扫前后燃料的组成变化

氮气吹扫前后燃料的质谱图如图2所示,从图2中可以看出燃料的组成没有变化。

4.2.2 氮气吹扫参数的确定

1) 氮气流速的影响。在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下、普氮(纯度为99.5%~99.9%)分别以100 mL/min和120 mL/min的流速吹扫,两次的结果基本相同,吹扫1.5 h后燃料中的溶解氧和水的质量分数即可达到要求,二者对比如图3所示。

2) 氮气纯度的影响。在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,用高纯氮(纯

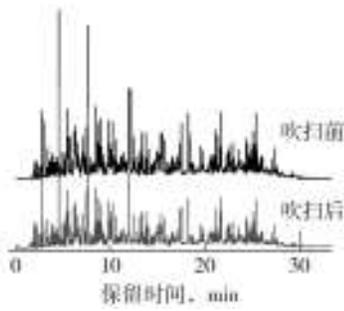


图2 氮气吹扫前后燃料的质谱图

Fig. 2 Mass spectrum of fuel before and after nitrogen blowing

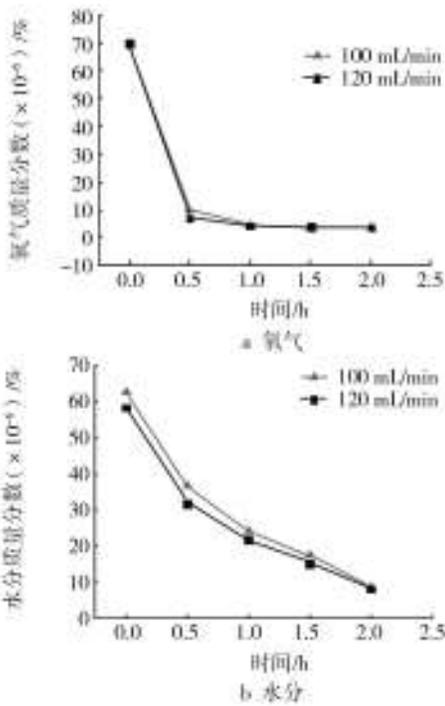


图3 不同氮气流量吹扫后氧含量和水含量的曲线

Fig. 3 Oxygen and water content curves after blowing at different nitrogen flow rates

度为99.999%)吹扫,与普氮的吹扫结果接近。吹扫1.5 h后燃料中溶解的氧和水即达到要求,二者对比如图4所示。

3) 温度的影响。100 mL/min 高纯氮吹扫条件下,对比不同温度下的吹扫结果,如图5所示。升高温度对脱除溶解氧的影响不显著,升高温度可以加快脱除溶解水。

4) 处理前后燃料中的溶解氧和水的含量。将处理前后的燃料中溶解氧和水的数据进行综合测试分析,用氮气吹扫后,燃料中的水含量可以控制在16 mg/kg以下、氧含量控制在6 mg/kg以下。

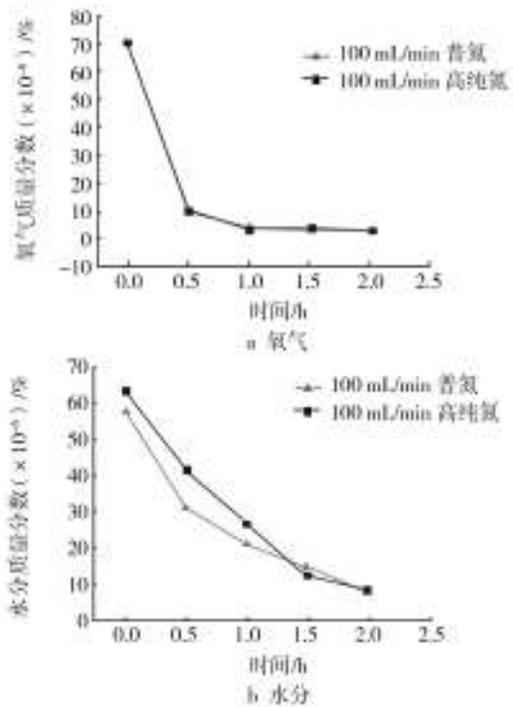


图4 不同纯度氮气吹扫后氧含量和水含量的曲线

Fig. 4 Oxygen and water content curves after blowing with different purity nitrogen

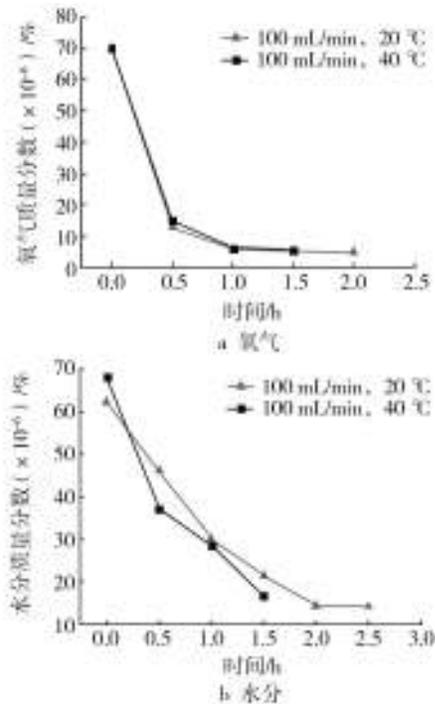


图5 不同温度下氮气吹扫后氧含量和水含量的曲线

Fig. 5 Oxygen and water content curves after blowing with different temperature nitrogen

4.2.3 物理法的可操作性

1) 处理装置组成:处理罐、氮气系统、温度控制

系统、测量系统。

2) 测试方法:水含量的测试采用注射器从处理罐中抽取燃料,注入水分仪中,用天平称出燃料质量,输入水分仪,计算出水含量。氧含量的测试采用溶氧仪,燃料中氧的溶解量为 50 ~ 70 mg/kg,取上限为 70 mg/kg,如果吹扫后测试值降至初始值的 10%,则认为残余的溶氧量为 7 mg/kg。

用物理方法对 3 号喷气燃料进行脱水脱氧处理,装置组成简单,操作工艺方便,无原材料浪费,较化学方法经济实惠。

5 结论

化学法和物理法都能生产出合格的脱水脱氧燃

料,以满足发动机喷气燃料低温性和贮存性要求。相对于工艺过程复杂的化学方法,物理方法所需设备组成简单、操作工艺方便,可以实现发动机试车台现场制备,解决了异地制备、长途运输的难题。

参考文献:

- [1] 梁文杰. 石油化学[M]. 东营:中国石油大学出版社,2009: 215.
- [2] 南国枝. 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,2007,31(2):139—142.
- [3] 刘济瀛. 中国喷气燃料[M]. 北京:中国石化出版社,1991: 52—158.
- [4] 范启明. 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):222—263.

(上接第 93 页)

根据表 4 的数据,以严酷度为横坐标,以故障模式危害度 C_m 为纵坐标,绘制危害性矩阵,如图 1 所示。在绘制时,选取的故障模式危害度大于 0.5×10^{-6} 才在图上标绘。可以由危害性矩阵图看出,综合考虑故障模式的危害度和严酷度,故障风险优先的顺序依次是 $M_3 > M_6 > M_7 > M_1 > M_2 > M_8$ 。

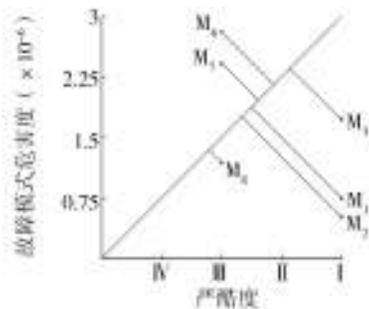


图 1 故障危害性矩阵

Fig. 1 The criticality matrix

4 结论

为有效地提高装备的使用效率,必须采取相应的措施对故障风险高的故障模式进行改进或加大检

查力度。

主伞的故障风险最高,其原因为伞包折叠错误,无法打开,该故障受人为影响很大,而且该故障发生时的严酷度很高,所以必须对该故障进行改进。该故障模式的严酷度无法降低,并且可检性很低,在使用中要有效降低该故障模式的故障率,其主要措施是在折叠伞包时必须指派有经验的叠伞员进行操作,平时还要加强叠伞员的练习,在试飞前还要加强对伞包的检查。

停车电路无输出和开伞、切伞电路无输出故障的影响也比较大,这两个故障都是电路故障。减少故障发生的主要方法是加强飞行前的试车检查,保证在飞机起飞前这些电路状况良好。

参考文献:

- [1] 赵东元. 可靠性工程与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2009:141—143.
- [2] GJB 450A—2004, 装备可靠性工作通用要求[S].
- [3] 陆廷孝. 可靠性设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社, 1995:138—139.
- [4] 李海泉. 系统可靠性分析与设计[M]. 北京:科学出版社, 2003:110—114.