

Control of Microbial Contamination in Aircraft Fuel System

Daizhong Hu¹, Jun Han¹, Ran Zhang¹, Yongxing Zhang², Yilong Xing², Xin Zhao², Meng Li²

¹National Aviation Fuel Co., Ltd., Beijing

²Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan Sichuan

Email: mokechi@163.com

Received: Oct. 26th, 2018; accepted: Nov. 7th, 2018; published: Nov. 14th, 2018

Abstract

The problem of microbial contamination and its control of aircraft fuel system have received a great deal of attention by the aviation operation companies. Therefore, the employees in aviation operation should have a corresponding understanding of the microbial contamination and its control measures of aircraft fuel system. Based on civil aviation, the microbial contamination of aircraft fuel system and its harm to the safe operation of aircraft have been discussed. In addition, the research status of microbial contamination and its control in aircraft fuel system at present have been summarized. The common detection methods and maintenance measures of microbial contamination in aircraft fuel system in practice have also been introduced.

Keywords

Microbial Contamination, Test, Fuel Tank Drainage, Fuel Sampling, Sterilization

飞机燃油系统微生物污染的防控

胡代忠¹, 韩军¹, 张然¹, 张永兴², 邢一龙², 赵欣², 李梦²

¹中国航空油料有限责任公司, 北京

²中国民用航空飞行学院, 四川广汉

Email: mokechi@163.com

收稿日期: 2018年10月26日; 录用日期: 2018年11月7日; 发布日期: 2018年11月14日

摘要

飞机燃油系统的微生物污染及防控问题一直受到航空运行单位的高度重视, 航空运行的从业人员对飞机燃油系统微生物污染及其防控措施也应建立起相应的认识。本文立足于民用航空, 讨论了飞机燃油系统

文章引用: 胡代忠, 韩军, 张然, 张永兴, 邢一龙, 赵欣, 李梦. 飞机燃油系统微生物污染的防控[J]. 微生物前沿, 2018, 7(4): 131-140. DOI: 10.12677/amb.2018.74016

的微生物污染及其对飞机安全运行所带来的危害，综述了飞机燃油系统微生物污染防控的研究状况，介绍了实践中飞机燃油系统微生物污染的常用检测方法和维护措施。

关键词

微生物污染，检测，燃油箱放水，燃油取样，灭菌

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

航空油料的品质对航空安全具有重要影响，一旦受到污染的航油被输送加注到飞机上使用，将会给航空运行带来难以估量的严重后果。目前，随着人们对飞机燃油系统污染状态监测和研究的不断深入，针对航油污染物的研究热点已经由外来金属屑、纤维等固体颗粒物杂质方面，转变到了航油当中的微生物方面。所谓飞机燃油系统的微生物污染就是指飞机燃油系统中存在着一种或多种对飞机燃油系统会产生不利影响的微生物。现已查明，能够在航空油料生存繁殖的微生物种类达 200 多种[1]。飞机燃油中微生物的生长和繁殖能够引起油品降解，微生物本身及其代谢产物的不断积累也会产生腐蚀和堵塞问题，严重威胁飞行安全。因此，飞机燃油系统微生物的污染问题不容忽视。

2. 飞机燃油系统微生物污染的研究现状

微生物是指形态小的单细胞、单个简单的多细胞结构以及无细胞结构的生物。微生物包括细菌、病毒、真菌和少数藻类等。飞机燃油系统中的微生物主要有细菌、霉菌类和酵母菌类，其中有两种对飞机燃油系统的危害较大。一种为枝孢霉菌，属真菌类。在适宜的条件下，其生长繁殖和代谢产物形成的粘液或浮渣会导致燃油系统部件的堵塞、油表失效和油箱腐蚀等问题。统计资料显示，有 93% 的污染案例都和它有关[2]；另一种是硫酸盐还原菌，它能在短时间内繁殖产生大量孢子，对金属有比较显著的腐蚀作用。

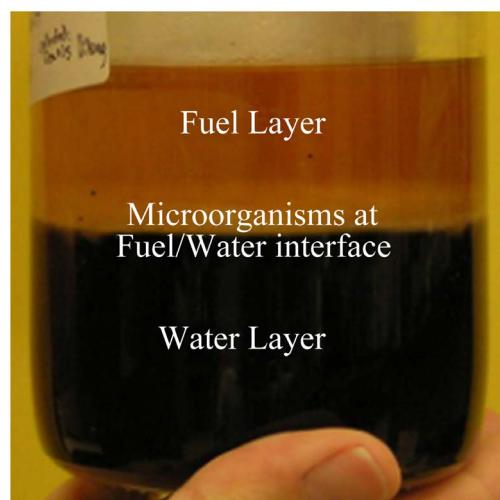


Figure 1. The microbial layer at Fuel/Water interface

图 1. 航油/水界面上的微生物层

飞机燃油系统是微生物生长的一个理想环境。酵母菌或真菌生长繁殖必需的三个重要条件为营养物质、水和适宜温度，航空燃油为微生物提供必需的营养物质；航空燃料在运输、储存和使用过程中，不可避免的要接触到各种水；油箱中微生物生长的最适宜温度是 25℃~35℃，但极度寒冷的温度通常不能将其完全杀死，而是使其处于休眠状态，当温度回升并满足其生长的条件时，这些微生物又将活跃起来。随着油箱内水分的积聚，微生物生长的风险将显著增大。微生物生长的速度与燃油温度、燃油中水的含量及分布情况、燃油量和油箱内空气的相对湿度等因素有关。因此，航油储罐和飞机燃油箱中的微生物主要生长在燃油和水的界面处，如图 1 所示[3]。微生物以燃油中的碳氢化合物为食，其代谢物可形成膏泥状物质、活性物质和悬浮物质。随着飞机对航油的分配和使用，燃油箱的扰动会使微生物悬浮在燃油中，从而导致油相被完全污染，如图 2 所示。

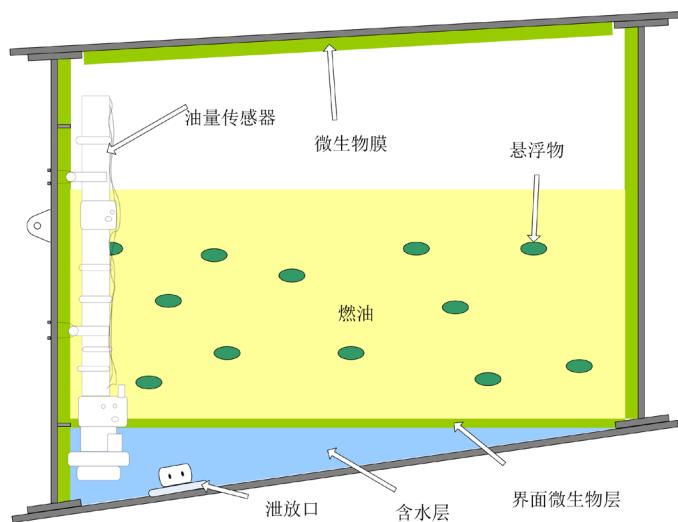


Figure 2. The microbial contamination of aircraft fuel tank

图 2. 飞机燃油箱内的微生物污染状况

Table 1. Monitoring results of fuel microbial contamination in an airline maintenance from 2015 to 2017
表 1. 自 2015 年至 2017 年某航空公司维修基地燃油微生物污染的监测统计结果

机型	质量燃油微生物检测(次)			中度以上阳极结果(次)			实施灭菌(次)		
	15年	16年	17年	15年	16年	17年	15年	16年	17年
B737	14	23	17	4	3	4	3	1	2
B757	18	14	18	1	1	6	0	0	1
A320 系列	18	18	31	4	9	15	1	2	4
A330	5	2	9	2	1	3	0	0	0
合计	55	57	75	13	14	28	4	3	8

表 1 是 2015 年至 2017 年某航空公司维修基地执管机队燃油取样微生物污染监测的统计结果。不难看出，飞机燃油系统发生微生物污染的情况并不罕见。该航空公司整个机队中度以上的燃油微生物污染阳性率呈逐年增长的趋势，尤其是 A320 系列机队中度以上燃油微生物污染的阳性率达到了 50%。需要强调的是，操作人员必须按飞机维护手册的相关规定规范地实施燃油取样程序，并对样本测试结果给出准确的判定。应该避免在燃油取样到测试过程中，因操作不当对样本造成污染，从而获得阳性结果。同时，当测试和分析结果的离散性比较明显时，也应进行重复测试。

飞机燃油箱和燃油系统的微生物污染可导致飞机运行出现一系列问题，主要包括：

- 1) 堵塞。微生物的代谢产物会形成胶状沉积物或悬浮物，堵塞飞机燃油滤；聚集在喷油嘴中，导致喷油嘴的堵塞；沉淀物则会导致燃油排放孔的堵塞等。进而造成其他仪表和控制部件的失效。
- 2) 腐蚀。微生物能够破坏油箱的涂层和密封，粘附在涂层上以其为营养物质生长繁殖并腐蚀涂层，进而对铝合金油箱进行腐蚀，可能会导致漏油事故。
- 3) 微生物污染造成飞机不能正常使用和非计划停场排故及与之相关的其他问题(如航材紧急订货)以及由于燃油计量波动而增加燃油消耗等，必然给航空公司带来相当大的经济损失。

因此，对飞机燃油系统微生物污染的控制必须予以高度重视。

3. 飞机燃油系统微生物污染的检测

在民航实践中，飞机燃油系统微生物污染常用的检测方法有微生物培养检测法、间接检测法和设备检测法等。

3.1. 微生物培养检测法

微生物培养检测法一般是取一定量的燃油样本，将其加入细菌培养基中，样本中的微生物就被接种到了新的细菌培养基中。然后在一定的温度下培养一段时间，通过对细菌培养基中菌落的计数，换算成燃油样本中微生物的数量，从而判定微生物的污染程度。

3.2. 间接检测法

飞机燃油系统受到微生物污染后会引起一系列的故障征兆，表现为由虚假的或超范围的油量传感器输入参数所引起的燃油量指示系统(FQIS) [4]过读(Over Reading)；燃油密度计指示精度降低；放出的水或燃油样本变色；燃油滤堵塞警告及油滤上附着有污染物等一系列现象。若观察到上述现象，即说明飞机燃油系统受到了相当程度的微生物污染。

3.2.1. 基于 FQIS 系统的间接检测法

飞机燃油量指示系统通常采用基础电容传感器来测量燃油量。由于微生物和水的介电常数与燃油不

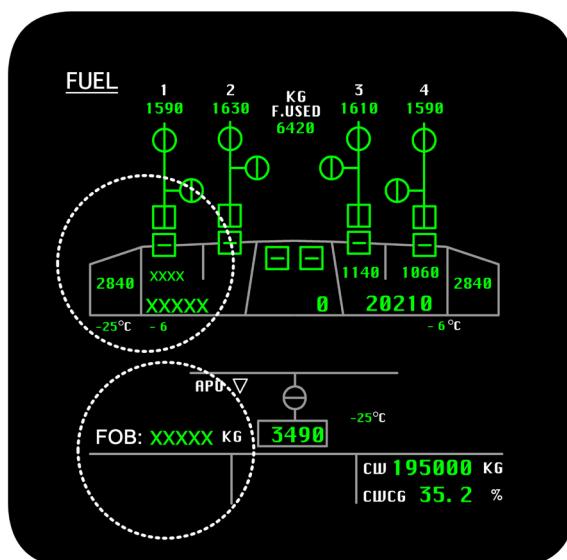


Figure 3. ECAM fuel indicator

图 3. ECAM 燃油量指示

同, 当被污染燃油的介电常数超过电容传感器的正常测量范围时, 燃油量指示计算机(FQIC)即宣告相应传感器失效。当某几个传感器被宣告失效时, 驾驶舱内的指示系统会反映出 FQIS 系统已性能退化。图 3 为飞机驾驶舱的飞机电子中央监控系统(ECAM)燃油页面, 该页面显示出该飞机左机翼的 FQIS 系统性能已完全退化。此时即间接表现了飞机燃油系统受到了微生物污染。

油量传感器的电容读数也可以显示出受影响的传感器。图 4 是打印的 A320 飞机 FQIC 的电容传感器输入参数, 表示该飞机左机翼 FQIS 系统性能完全退化。

CH1 FQIS	FUEL PROBE	CAPACITANCES	→
XXXXX	142.1	XXXXX	67.1
XXXXX	98.5	XXXXX	46.5
XXXXX	35.2	XXXXX	34.3
XXXXX	48.5	29.1	XXXXX
82.8	82.3	82.7	63.9
59.6		14.3	94.8
134.2	142.8	106.7	67.6
122.5	99.9	66.8	58.1
35.5	35.7	27.8	34.4
54.9	41.2	29.1	282.9

Figure 4. Printed capacitive sensor input parameters for the A320 aircraft FQIC
图 4. 打印的 A320 飞机 FQIC 的电容传感器输入参数

3.2.2. 油滤堵塞警告和污染物证

酵母菌或霉菌团的尺寸通常都大于 $1\mu\text{m}$, 因而在燃油进入发动机系统前发动机的过滤介质可滤除燃油中大部分的这类微生物污染物, 但过滤元件上的微生物是无法用肉眼直接观察的。据民航资料记载[5], 某航空公司 737-300 飞机组反映左发动机起动慢, 机务人员检查左发动机主燃油滤, 发现有大量粉末物质, 如图 5 所示。盛放排油的容器底部也有一定数量的相同物质。用手电筒照射时, 这些粉末物质呈现出金属光泽, 因此这些粉末物质从发现至排故结束一直被称为“金属屑”。机务人员为了找到主燃油

This is a black and white micrograph showing a heavily contaminated fuel filter screen. The surface is covered with a dense, irregular mass of dark, fibrous material and smaller, lighter-colored particles. In the bottom right corner, there are some technical markings: '0006 20.010', 'X500', '10 μm', and 'HL 7200, No.1'. The overall texture is grainy and shows significant biological activity.

Figure 5. Main fuel filter screen contaminated by microorganisms
图 5. 被微生物污染的燃油主油滤滤网

DOI: 10.12677/amb.2018.74016

135

微生物前沿

滤中这些“金属屑”的真正来源，花费了大量的人力、物力，前后历时 16 个月，检查、更换飞机左发动机主燃油滤达 30 多次，两次更换了主燃油泵、燃调，甚至更换了两个油箱增压泵。最终发现，这些“金属屑”实际上是左主油箱的微生物及其代谢产物。因此，飞机出现发动机燃油滤堵塞警告后，建议除了检查燃油滤外，还应该对燃油进行取样分析。

3.2.3. 基于 FQIS 系统的间接检测法

清洁的燃油样本应该是清亮透明的。受微生物污染的油品在其颜色外观及气味方面会发生变化。比如，若航油中含有未溶解的水，燃油样品就会显得模糊不清。从航油储罐或飞机燃油系统中泄放出的燃油样本如果呈现出了不正常的颜色或气味，如沉积粘液、悬浮物质、浓烈的硫化物气味(臭鸡蛋味)等，都是油品已被微生物污染的表现。**图 6** 中是未受污染的清洁燃油与被污染燃油的对比情况。



Figure 6. Comparison of uncontaminated fuel with contaminated fuel

图 6. 未受污染的清洁燃油与被污染燃油的对比

当探测到或怀疑有比较显著的微生物污染时，应对燃油箱进行检查以确认油箱是否存在生物膜，如**图 7** 所示。泄放出所有燃油后，油箱等燃油系统中的微生物污染物即成为可见的深色固体物质，这些固体污染物可能呈现出桃红褐色、灰褐色以及橄榄绿等多种颜色。由于水都沉聚在油箱的底部，所以油箱底部是微生物最容易生长的地方，在进入燃油箱进行检查时，应特别留意燃油补偿器/密度计和燃油传感

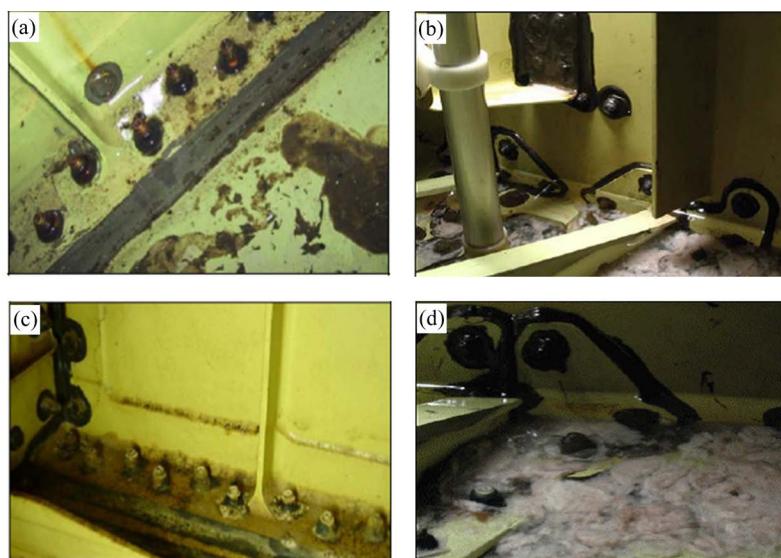


Figure 7. The microbial contamination of fuel tank

图 7. 燃油箱内的微生物污染

器上是否存在沉积物，并对油箱的整体污染情况(如结构上的黑斑、腐蚀痕迹、油滑的半透明凝胶材料等)进行目视检查。此外，还应检查油箱和燃油系统设备(燃油传感器、燃油泵壳体等)的一般污染情况、密封剂的损坏情况、燃油箱结构腐蚀情况，以及内部保护涂层是否出现了明显变质等。在检查供油箱时应注意检查集油池的污染情况。

3.3. 设备检测法

设备检测法是指利用特定的设备对燃油样本进行测试，可以获得航油样本定性或定量的微生物污染程度。目前，国际航空运输协会(IATA)推荐了几种测试方法，如 HY-LITE Jet2、Micob Monitor²、FuelStat TM Resinae 等。

目前，民航多采用 HY-LITE Jet2 法进行油样微生物的定期检测。HY-LITE Jet2 法即通过油样单位体积相对光量值 RLU/L 等特性指标对微生物 ATP(三磷酸腺苷)的含量进行快速检测标定。其中，RLU 不是一个科学计数单位，仅仅是一个样品中光产生量的相对测试值。从测试航油中采集的样品在 HY-LITE 样品笔中与缓冲溶液中的荧光素酶试剂混合，ATP 与酶试剂发生特异性反应发光，再在 HY-LITE 荧光检测仪中测定发光强度。ATP 越多，光强度越高相应的仪器读数越大。根据测定结果可将航油微生物污染分级为可忽略的污染($ATP \leq 1000 \text{ RLU/L}$)、中度污染($1000 < ATP \leq 500 \text{ RLU/L}$)重度污染($ATP > 5000 \text{ RLU/L}$)。图 8 为 HY-LITE Jet2 法得测试设备。



Figure 8. The test equipment of HY-LITE Jet2
图 8. HY-LITE Jet2 法的测试设备

Micob Monitor² (MM²)检测法[6]的步骤为：a) 用注射器将待测油液(约 0.5 毫升)注入 Micob Monitor² 测试瓶中，盖上瓶盖并贴上标签；b) 轻拍测试瓶使凝胶体分散溶解，并剧烈摇晃 30 秒；c) 平放测试瓶，使凝胶体成为平层状。将其放在温暖(25℃)黑暗的地方 4 天培养；d) 检查测试瓶里红色和紫色菌落个数，并对其进行分析和记录。图 9 为 Micob Monitor² (MM²)检测法。

4. 燃油系统微生物污染的维护措施

燃油系统微生物污染防控的关键是要做好两项重要工作，即定期对燃油箱放水和定期进行燃油取样分析，以便监控获取燃油系统真实的微生物污染状况。

4.1. 有效放水

放水是降低微生物污染风险的关键性维护措施[7]。如前所述，微生物主要生存在水中并以燃油中的碳氢化合物为食。当水积聚在油箱内部时，微生物污染风险会随着水量的增加而增大，即水越多、积聚

得越快、分布得越广，越是可能发生微生物污染。燃油箱内总是存在一定量的水，这些水的来源途径主要是：提供给飞机的燃油本身含有水分(每 1000 gal 燃油最多可含有 0.2 gal 的水)；飞机下降时，由于相对温度、湿度和压力的变化使大量潮湿空气进入燃油箱并在油箱壁上形成冷凝水；加油操作程序上的缺陷使燃油箱进入了水分等。因此，应当严格按飞机维修计划文件(MPD)的要求定期通过排水活门对飞机燃油箱放水，而且放水周期应根据飞机运行的具体环境进行相应的调整。为了确定最佳的放水时间间隔，应当考虑以下因素：飞行航程的长短；飞行高度的大小；飞越/飞往国家/地区的气候；飞机利用率的高低等。飞行航程短，飞行高度低，飞越/飞往温暖潮湿的国家和地区，飞机利用率低，以及已经检测出了轻度微生物污染时，应适当缩短放水间隔。

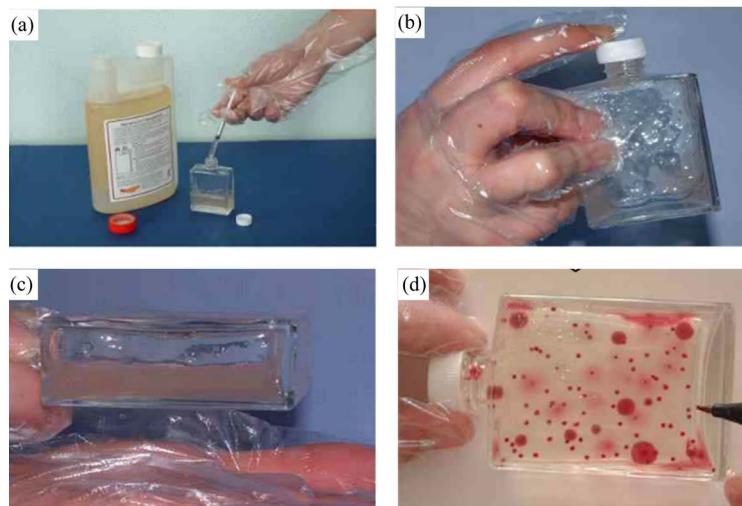


Figure 9. The detection method of Micob Monitor²
图 9. Micob Monitor² 检测法

4.2. 燃油取样分析

必须对飞机燃油箱的微生物污染情况进行监控。根据波音和空客的建议，对微生物污染风险低的飞机，应至少每 6~12 个月进行一次测试，对中度微生物污染风险的飞机，应至少每 3 个月进行一次测试，而对微生物污染高风险的飞机，应至少每个月进行一次测试。这样有利于监控污染可能的发展趋势，并据此提前制定油箱等燃油系统设备的清洁和处理计划。在燃油取样和测试期间，应避免油样的交叉污染以及化学制剂和防腐剂等污染物对油样测试结果的干扰。

燃油取样后应首先对燃油样本进行目视检查。与清亮的清洁燃油相比，被微生物污染的燃油是混浊不清的并散发出不正常的气味。从油样采集到测试期间油样中的微生物会发生增殖或死亡，因此，油样中活性微生物的数量是动态的。为了尽可能真实地反映燃油系统的实际污染程度，应尽快对所采集的油样进行测试。如果油样采集后不能在 4 小时内进行测试，应将油样存放在 0℃~5℃ 的环境中，并在测试前让其恢复到室温。

4.3. 燃油箱的人工清洁

当微生物污染测试结果判定为高度污染时，在灭菌前如果不先进行物理清除，那么使用的灭菌剂通常只能杀死生物膜外层的微生物，残存的微生物还会继续生长。因此，在灭菌前用物理方法清除燃油箱内的沉积物并彻底进行清洁对提高灭菌效果是至关重要的。飞机燃油箱内壁大多涂覆有铬酸盐环氧底漆，

该防护涂层能够防止铝合金腐蚀，还可浸出具有杀菌功效的铬酸盐。在这种情况下，如果采用高压清水冲洗程序进行沉积物的清除，将需要用大量的水，清洁后需要更长的干燥时间，因而飞机停场时间较长。与此同时，压力冲洗时的水压对油箱密封有一定损害。更为重要的是，过大的水压会促使底漆中所含铬酸盐浸出，损耗了漆膜表面的铬酸盐，使得油箱底漆中所含铬酸盐的杀菌特性减弱。有鉴于此，物理去除沉积物时建议采用人工清洁程序，这样不仅可以减少油箱结构与清洗用水的接触，还能减少对油箱结构造成的可能损伤[8]。

4.4. 燃油箱灭菌和灭菌剂浓度的确定

当微生物污染测试确认为中度或重度污染时，单纯的清洁程序并不能杀死细菌，清洁后燃油箱必须按飞机维护手册中的相关要求用灭菌剂进行化学处理以杀死分离的残余微生物。灭菌剂是用于防止燃油箱生长微生物的广谱抗微生物化学制剂。航空实践中，灭菌剂可用来执行两个功能，一是化学清除微生物污染(飞机燃油系统灭菌)；二是预防微生物污染(飞机长期停放时封存飞机燃油系统)。目前，民航业常用的灭菌剂有 Kathon FP 1.5 和 Biobor JF 等[9]。灭菌剂的效力取决于灭菌剂的浓度、接触时间和灭菌时的温度等因素。特别需要注意的是，通过在飞机燃油系统中定期加入灭菌剂来实现抑菌灭菌的方法是不推荐的，也是不被允许的。这是因为，即便忽略灭菌剂加入燃油后对燃料热值造成的不利影响，菌剂的浓度太高会对燃油箱造成腐蚀，而浓度太低则又会导致微生物对灭菌剂产生耐药性。如果灭菌剂没有充分的作用时间，也会导致灭菌效果不理想。因此，按正确的剂量加入灭菌剂并保持充分的浸泡时间是非常重要的。灭菌剂的浓度在飞机维护手册中有明确的规定：使用 Biobor JF 灭菌剂杀灭飞机燃油系统中的微生物时，实现发动机正常燃烧所允许的最大灭菌剂浓度按体积计为 270 PPM (用溶质质量占全部溶液质量的百万分比所表示的浓度)；使用 Kathon FP 1.5 灭菌剂时，实现发动机正常燃烧所允许的最大灭菌剂浓度按体积计为 100 PPM。当灭菌剂用于封存飞机燃油系统时，所用浓度为上述用量标准减半，即可以采用 135 PPM 的 Biobor JF 灭菌剂或 50 PPM 的 Kathon FP 1.5 灭菌剂。

实际操作中，灭菌剂处理的浸泡时间与温度有关，但必须强调，由于灭菌剂是在燃油中起作用，所以确定灭菌剂处理浸泡时间的温度应考虑为燃油温度而非外界环境气温，燃油温度越高灭菌剂有效成分的杀菌效果越好。此外，所谓高温/低温的区分，根据飞机厂家的建议一般以 25℃ 作为参考点，当温度低于 25℃ 时考虑为低温，应采取较长的浸泡时间，当温度高于 25℃ 时考虑为高温，可适当缩短浸泡时间。当然，作为飞机的运行使用单位，最为关心的是实际的灭菌效果，因此，在实际生产安排上考虑并采用较长的灭菌剂处理浸泡时间，对实现有效灭菌将大有帮助。

5. 总结

飞机燃油系统微生物污染越来越受到航空业的关注，提高维修人员对燃油系统微生物污染检测方法及防控措施的认识，为其在实际维修过程中制定合理的维修方案提供参考，对降低微生物污染，确保燃油质量，保证飞机飞行安全，具有重要的意义。

基金项目

中国航空油料有限责任公司科技项目(航油科技-201707)；民航飞行技术与飞行安全科研基地基金项目(F2015KF05)。

参考文献

- [1] 赵安家, 施广生, 韩笑. 军机燃油微生物污染的研究[J]. 飞机设计, 2017(5): 48-52.

-
- [2] 吴曼, 侯民利, 胡成江. 飞机燃油系统中微生物的污染[J]. 失效分析与预防, 2007, 2(2): 58-61.
 - [3] Mccomb, J.P. (2009) A Metagenomic Analysis of Microbial Contamination in Aviation Fuels. *A Metagenomic Analysis of Microbial Contamination in Aviation Fuels*.
 - [4] 罗龙朋, 徐志开. 燃油污染预防与维护措施[J]. 航空维修与工程, 2010(4): 49-50.
 - [5] 冯振宇, 陈磊, 周惠文. 飞机整体油箱的微生物腐蚀及维护[J]. 航空维修与工程, 2009(3): 54-56.
 - [6] ASTM D7978 and IP613. Determination of the Viable Aerobic Microbial Content of Fuels and Associated Water-Thixotropic Gel Culture Method.
 - [7] ASTM D7463-08, “Standard Test Method for Adenosine Triphosphate (ATP) Content of Microorganismsin Fuel, Fuel/Water Mixtures and Fuel Associated Water”.
 - [8] Boeing 737-800 Structural Repair Manual (SRM) D634A210.
 - [9] IATA Microbiological Contamination in Aircraft Wing Tanks, 2011.

Hans 汉斯

知网检索的两种方式：

1. 打开知网首页 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN], 输入期刊 ISSN: 2327-0810, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: amb@hanspub.org