

国产航空发动机润滑油在国内民用飞机上的应用研究

周 群

(上海飞机设计研究院标准材料设计研究部,上海 200232)

Research on large civil aircraft by the Application of Domestic Aero Turbine Engine lubricant

Zhou Qun

(SMA Research Department, Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 200232, China)

摘要:介绍了航空发动机润滑油技术标准的发展历程,分析了国外航空润滑油的发展趋势和认证流程,研究了国产航空发动机润滑油在国内民用航空市场应用的渠道;明确了国产航空发动机润滑油达到国际先进水平所需要进行的工作。

关键词:发动机;润滑油;认证

[Abstract] Researching the application of Bayesian networks to the reliability assessment of pitch channel of flight control system for the limits of traditional fault tree analysis method—components must be independent with two states. The new method can not only compute the reliability indices, but also quantitatively analyze the weights of certain components in the system reliability to find the vulnerable position in the system.

[Key words] engine; lube; certification

0 引言

航空发动机润滑油主要用于航空发动机主轴承和传动装置的齿轮等摩擦部件的润滑和冷却,对发动机起到润滑、冷却、防锈、清洁和密封等多重作用。采用先进的润滑油可使发动机在苛刻的条件下持久稳定地工作,提高机械效率并保持发动机正常运转,减少发动机故障,节约能源和减少材料消耗,提高综合经济效益。因此,发动机润滑油是影响发动机性能、保证发动机工作可靠性和寿命的关键材料之一,被形容为航空发动机的“血液”。

目前,国产航空发动机润滑油主要使用在军用飞机和小型民用飞机。对于国内民航主力客运的大型客机,由于都是进口飞机,国外对航空发动机润滑油有特殊的要求,国产航空发动机润滑油难以涉足。

1 国产发动机润滑油应用的市场前景

我国民用航空市场正在持续、快速的发展,每年以 100 多架飞机的速度在增加。根据中国民航局适航司最新出版的《适航审定部门年度报告》统计,截至 2008 年底,中国民航现有固定翼飞机 2 043 架,旋翼飞机 149 架,飞机发动机共计 3 870 台(其中涡轮发动机 3 138 台,活塞发动机 732 台)。假定每架飞机每年飞行 300 天,发动机润滑油的标准消耗为 1.892 升/台·天,则年消耗量约为 22×10^6 L,市场价值超过 2 亿人民币。

在我国社会经济快速发展的推动下,民用航空业发展迅猛,随着大型客机项目的启动,自主研制的

大型客机将来必定会走出国门、走向世界。根据市场预测,未来 20 年内(2016–2035 年)120 座级以上的单通道飞机数量为 18 470 架,航空发动机润滑油市场需求也将日益增大,因此,开发能与国外航空发动机润滑油相媲美的国产润滑油,具有较好的市场前景和良好的经济价值。

2 航空发动机润滑油的分类和代表产品

由于航空发动机技术不断更新和发展,其主轴承温度不断提高,使得航空发动机润滑油的规格和质量水平较以前均有较大的变化和发展,国外的航空发动机润滑油分类主要是以 100℃ 时的运动黏度来区别。航空喷气发动机润滑油黏度级别主要有: $3\text{mm}^2/\text{s}$ 、 $4\text{mm}^2/\text{s}$ 、 $5\text{mm}^2/\text{s}$ 、 $7.5\text{mm}^2/\text{s}$ 。为了兼顾高低温性能,民用航空发动机主要使用的是黏度为 $5\text{mm}^2/\text{s}$ 的润滑油。从近年来发展趋势来看, $7.5\text{mm}^2/\text{s}$ 润滑油逐渐被 $5\text{mm}^2/\text{s}$ 取代。

国内外民用航空发动主要使用的润滑油有:美孚公司的 Mobil Jet Oil II 和 Mobil Jet Oil 254、BP 公司的 BPTO 2380 和 BPTO 2197、壳牌公司的 AeroShell Turbine Oil 500、AeroShell Turbine Oil 560 等,其都是黏度为 $5\text{mm}^2/\text{s}$ 的润滑油。

3 航空发动机润滑油技术标准的发展

3.1 国外发动机润滑油执行的标准简介

(1) 美军标 MIL-PRF-7808L,适用于黏度为 $3\text{mm}^2/\text{s}$ 的低黏度型润滑油,与其相应的有法国标准

AIR3514 和俄罗斯 ИПМ-10 和 ВНИИИП-50-1-4Φ 标准。满足 MIL-PRF-7808L 标准的润滑油适用于快速反应的新型战斗机及其配套发动机上。

(2) 美军标 MIL-PRF-23699F, 适用于黏度为 $5\text{mm}^2/\text{s}$ 的中黏度型润滑油, 与其相应的有英国 DERD2497 标准。满足 MIL-PRF-23699F 标准的润滑油更适用于对油品热氧化稳定性要求更高、黏度

更大的发动机。

(3) 民用航空发动机润滑油 SAE AS 5780A, 适用于黏度为 $5\text{mm}^2/\text{s}$ 的中黏度型润滑油。

3.2 美军标 MIL-PRF-23699F 标准的发展

美国海军于 1963 年 6 月颁布了以多元醇酯为基础油的飞机涡轮发动机润滑油标准 MIL-L-23699。表 1 列出了该标准的发展过程。

表 1 发动机润滑油标准 MIL-L-23699 修订情况

标准号	发布/修订时间	主要内容及修订内容
MIL-L-23699	1963.06	新发。100℃运动黏度为 $5\text{mm}^2/\text{s}$, 使用温度范围是 $-40^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$
MIL-L-23699A	1966.02	提高闪点、铜腐蚀、齿轮承载能力等方面的性能要求, 采用 F 橡胶试验
MIL-L-23699B	1969.10	进一步提高航空发动机润滑油闪点性能, 要求航空发动机润滑油能顺利通过 274℃热稳定和腐蚀试验, Ryder 齿轮变更要求
MIL-L-23699C	1978.10	标准要求报告航空发动机润滑油所有腐蚀与氧化稳定性试验中所产生的沉淀值, 在 204℃下进行腐蚀与氧化稳定性试验时, 其沉淀值含量不能超过 $50\text{mg}/100\text{g}$ 润滑油; 轴承试验升级, 要求试验前后运动黏度变化不能超过 $-5\% \sim 25\%$
MIL-L-23699D	1990.10	标准对进行腐蚀与氧化稳定性试验时的各金属试片提出要求, 且所有氧化试验的沉淀值含量均不能超过 $50\text{mg}/100\text{g}$ 润滑油, 此外, 标准要求对航空发动机油进行发动机台架实验和在装有小型发动机的飞机上试飞
MIL-L-23699E	1994.08	将航空发动机润滑油进行分类, 润滑油分成了两个等级: 标准型 (STD) 和防腐型 (C/I); 在润滑油台架性能试验中, 特别增加了对防腐油进行轴承腐蚀试验的规定
MIL-PRF-23699F	1997.05	为进一步满足航空发动机轴承的高温要求, 标准将润滑油分为三个等级: 标准型 (STD)、防腐型 (C/I) 和高热稳定型 (HTS), 高热型航空发动机润滑油对航空发动机油的腐蚀和氧化稳定性以及高热稳定性的要求大大提高, 以满足不断发展的航空发动机对航空发动机润滑油提出的新要求

MIL-PRF-23699F 包含 3 个类型的润滑油: 标准型 (STD)、防腐型 (C/I) 和高热稳定型 (HTS)。防腐型 (C/I) 润滑油专门为美国海军飞机发动机使用, 民用飞机发动机采用的是标准型 (STD) 和高热稳定型 (HTS)。

3.3 SAE AS5780 标准的发展

除美军标外, 一些航空发动机制造商也根据实际需要, 制定了相应的 OEM (Original Equipment Manufacture 原始设备制造商) 标准, 如 Pratt&Whitney 公司的 PWA521 (type II, 5cst) 标准、GE 公司的 D50 TF1 标准、Allison 公司的 EMS53 标准等。OEM 标准与 MIL 标准不同之处是增加了部分与发动机相关的台架试验。由于民用客机的迅猛发展, 促进了民用航空发动机润滑油的研究开发与

认证。与军用航空发动机润滑油相比, 民用飞机发动机润滑油在可靠性、安全性、质量保障性等方面有更高要求。面对民用航空发动机不断创新发展, 也给发动机润滑油带来新的挑战。2000 年, SAE 组织以 MIL-PRF-23699 标准、英国国防部标准 DEF STAN 91-101/ISSUE 2 (DERD 2499) 以及 Pratt&Whitney 公司的 PWA521 (type II, 5cst) 标准和 GE 公司的 D50 TF1 标准等为参照标准, 针对民用航空发动机润滑油制订了一个航空燃气涡轮发动机油的核心技术标准 SAE AS5780。

SAE AS5780 在 MIL-PRF-23699 评定性能的基础上新增加了与弹性体的相容性、氧化稳定性、沉积性能、摩擦 (润滑) 性能的评定方法, 增加的评定方法和性能指标见表 2。

表 2 SAE AS 5780A 相比 MIL-PRF-23699F 增加的评定方法

序号	性能	评定方法	指标	
			SPC	HPC
1	与弹性体的相容性(24/120h), % (W) 氟橡胶(200℃) LCS 氟橡胶(200℃) 丁腈橡胶(130℃) 硅橡胶(175℃) 全氟橡胶(200℃)	Def Stan 05-50(Part61) Method 22	≤10/15 ≤10/20 报告 报告	— 报告
2	氧化稳定性 温度系数(192h) E 温度,℃ A 温度,℃ V 温度,℃ B 温度,℃ Z 温度,℃	Def Stan 05-50(Part61) Method 9	≥185 ≥190 ≥185 报告 报告	≥190 ≥190 ≥190 ≥205 ≥210
	有效寿命(200℃) 蒸发损失,h 酸值增加,h 运动黏度增加,h 不溶物增加,h		≥90 ≥100 ≥60 ≥225	— — — —
	有效寿命(250℃) 蒸发损失,h 酸值增加,h 运动黏度增加,h 不溶物增加,h		≥3 ≥0.5 ≥1.0 ≥20	≥4.9 ≥1.4 ≥1.9 ≥22
3	沉积性能,HLPS 动态结焦(375℃) 20h 沉积物,mg 40h 沉积物,mg	SAE ARP5996	报告 —	≤0.4 ≤0.6
4	摩擦性能 承载能力,负荷级	SAE AIR4978 Appendix E WAM	≥15	

SAE AS5780 标准包含两种规格润滑油:标准型(SPC)和高性能型(HPC),分别与 MIL-PRF-23699F 标准中的标准型(STD)和高温稳定型(HTS)对应。与 SPC 型相比,HPC 型航空发动机润滑油能耐受更高的温度,产生更少的结焦。

3.4 民用航空发动机润滑油标准的发展分析

目前,民用航空发动机润滑油 MIL-PRF-23699F 标准和 SAE AS5780A 标准共存。英、法两国的标准大体和美国 MIL 标准相当,符合 MIL-PRF-7808L 和 MIL-PRF-23699F 标准的润滑油仍是国际上使用最广泛的品种。

相对以前的标准,SAE AS5780 标准虽然制订时间较晚,但是是针对民用航空发动机润滑油而制

定,因此具有更全面的性能要求和更严格的质量控制要求,具有较好操作性,其影响力在逐渐增强。近些年新研制的民用发动机润滑油一般都按照 SAE AS5780A 标准进行验证,民用航空发动机润滑油主要生产厂商(如 Exxon Mibil、BP 和 AeroShell 公司等)开始按照 SAE AS5780 标准进行验证。笔者预计,SAE AS5780 标准将逐渐成为民用航空发动机润滑油的一个主要发展方向。

4 国产发动机润滑油及其发展对策研究

4.1 国产航空发动机润滑油的主要产品及其标准

国产航空发动机润滑油的主要产品有 4050、

4106 和 925 三个牌号,性能指标相当于 MIL-PRF-23699F 中的标准型(STD)。国内航空发动机润滑油已形成了系列产品,基本满足了我国军用发动机的发展需求,也为研发民用航空发动机润滑油奠定了较好的技术基础。

国产航空发动机润滑油的执行标准是 GJB1263《航空涡轮发动机润滑油》,该标准是参照较早的 MIL-L-23699 标准而制定的,仅有 MIL-PRF-23699 标准中的标准型(STD 型)一种类型产品。但是 MIL-L-23699 在不断更改换版,现在的版本是 MIL-PRF-23699F,其内容已有很大变化;而 GJB1263 自 1991 年发布后尚未改动,因此,GJB1263 与 MIL-PRF-23699 相比较,缺少沉积试验、轴承试验和齿轮试验等性能指标要求。

沉积试验、轴承试验和齿轮试验指标要求对航空发动机有重要影响。沉积试验和轴承试验是考察润滑油高温性能的重要指标,评定润滑油的沉积物形成及氧化腐蚀性能;齿轮试验是考察润滑油润滑性能的重要指标,评定润滑油的承载能力。轴承和齿轮的工作可靠性和使用寿命同所用润滑油的性能密切相关,轴承沉积试验方法和齿轮承载能力测定法是评定航空发动机润滑油使用性能的重要指标。

4.2 国产航空发动机润滑油的发展对策研究

由于我国大型民用客机所用的发动机基本采用进口,发动机润滑油也全部使用国外发动机润滑油,从未正式使用过我国研发生产的航空发动机润滑油。国产发动机润滑油尚未经过认证组织和航空发动机生产厂家全面的质量技术认证,无法在大型飞机上使用。

国产航空发动机润滑油标准与国际标准无法接轨,润滑油的品质差距也限制了其应用范围。开展润滑油 OEM 认证就是指润滑油厂商与飞机发动机制造商合作进行润滑油的认证和开发,满足发动机的实际用油要求。发动机制造商有自己的选油策略,往往采用指定用油的方式,选择有实力的润滑油制造商进行合作。我国某些企业已具备航空发动机润滑油研发能力和技术条件,同时具备了批生产稳定性试验验证的能力,按照 MIL-PRF-23699 标准或 SAE AS5780 标准对国产发动机润滑油进行认证,可实现国产发动机润滑油在国内民用飞机上的使用。

5 国产发动机润滑油应用的认证流程

国产发动机润滑油从研制到应用的流程可以用图 2 来表示。

5.1 国产航空发动机润滑油与国外同类产品的性能对比试验

开展航空发动机润滑油同类产品对比分析试验(SPC 型润滑油可与 Mobil Jet Oil II 对比;HPC 型润滑油可与 BP 公司的 BPTO 2197 对比),对比试验按照 MIL-PRF-23699 或 SAE AS5780 的试验要求进行全性能试验,根据试验结果分析国产润滑油在性能上的优劣,完善配方,保证国产润滑油达到或超过国外同类产品的性能要求。

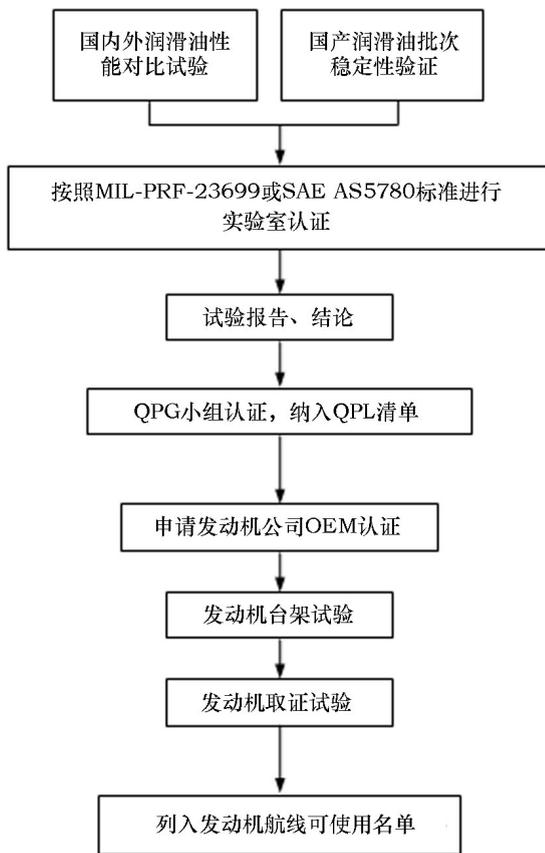


图 1 航空发动机润滑油的认证流程

5.2 国产航空发动机润滑油批次稳定性验证

为保证飞机发动机安全运行的可靠性,还应进行产品稳定性验证,这也是适航的基本要求,是必不可少的程序。润滑油批次稳定性验证试验项目有:

- 1) 基本理化性能;
- 2) 腐蚀和氧化稳定性;
- 3) 腐蚀和热稳定性;

4) 润滑性能;

5) 润滑油与橡胶相容性研究。

5.3 实验室认证

实验室认证要求按照 MIL-PRF-23699F 或 SAE AS5780A 标准进行。按照 MIL-PRF-23699F 标准,需进行物理、化学性能试验以及齿轮带负荷运行能力、轴承沉淀和轴承腐蚀试验;按照 SAE AS5780A 标准,则需进行物理、化学性能试验以及稳定性能试验、沉积性能试验和摩擦性能试验。试验完成后由实验室出具测试报告,给出润滑油是否符合标准的结论。目前,具备航空发动机润滑油验证试验资质的实验室均在国外,其中大部分实验室在美国。

5.4 QPG 小组认证

满足 MIL-PRF-23699F 或 SAE AS5780A 标准规定的润滑油,可以由 SAE 组织的附属机构——性能审查研究所(RPI, Performance Review Institute)指定资格认证小组(QPG, Qualified Products Group, 该机构的职责是评估制造商产品是否符合相关的标准)进行产品评估和认可,将产品列入认证产品清单(QPL, Qualified Products List)。

5.5 OEM 认证阶段

产品列入 QPL 后,发动机润滑油生产企业可以向发动机制造商提出申请,进行 OEM 认证。获得 OEM 认证是国产发动机润滑油能否最终应用到国内民用飞机上的关键。OEM 认证包括发动机台架试验和发动机取证试验。

发动机台架试验项目:(1)进行核心机试验,试验后需要拆开核心机,检测核心机转子支撑轴承的工况;(2)发动机滑油系统试验,检查滑油系统部件,包括滑油箱、油滤、垫圈、滤网、换热器;检查发动机内部受油池的内表面、封严圈;检查内部齿轮箱、传动齿轮箱、附件齿轮箱内部的滑油结焦和沉淀情况;检测润滑油粘性、酸性等性能指标;(3)发动机耐久性试验,发动机连续开车 500h,检测整个发动机持久运行的情况。

发动机的取证试验包括部分台架试验内容及飞行试验。飞行试验目的是检测滑油对整个发动机实际运行的影响,试验后检查发动机在试用滑油情况

下的整机性能。

完成发动机适航取证试验后,满足发动机滑油系统要求的产品才能列入发动机航线可使用名单。

6 结论

开展国产润滑油实验室认证,是我国航空发动机润滑油走向国际化、认证化的第一步。目前具备试验资质的试验室均在国外,而且主要集中在美国。面对在国际上久负盛名的知名润滑油品牌,缺少认证经验的国内航空发动机润滑油研发机构与生产厂家面临巨大压力。在国外民用航空发动机上从未使用过国产发动机润滑油,发动机 OEM 公司对验证国产润滑油也缺乏信心。因此,国产润滑油首次进行国外权威组织认证是一个艰苦而且充满风险的过程。

实现国产发动机润滑油在大型飞机上的应用,将增强我国基础材料的竞争力,提高我国民用航空的效益,也将带动国产润滑材料应用的新突破。

参考文献:

- [1]王毓民,王恒. 润滑材料与润滑技术[M]. 化学工业出版社,2005:587.
- [2]吕伯平,陈名华. 航空油液检测技术[M]. 航空工业出版社,2006:141.
- [3]林基恕. 航空燃气涡轮发动机机械系统设计[M]. 航空工业出版社,2005,238.
- [4]T. 曼格(德),W. 德雷泽尔(德). 润滑剂与润滑[M]. 化工工业出版社,2003,617.
- [5]3. Л. 索洛欣(苏). 航空空气喷气发动机试验[M]. 国防工业出版社,1982,334.
- [6]美国军用油料标准汇编(上册),中国人民解放军总后勤部物资油料部. 2003,535.
- [7]燃料与润滑材料、纺织材料. 中国航空材料手册[S]. 中国标准出版社,2002(10).
- [8]SAE AS5780A. (R)Specification for Aero and Aero-Derived Gas Turbine Engine Lubricants, AEROSPACE STANDARD[S],2000.
- [9]MIL-PRF-23699 F. Lubrication Oil, Aircraft Turbine Engine, Synthetic Base, Nato Code Number O - 156 [S], 1997.