

民用航空发动机滑油投入航线运行前工程鉴定试验研究

邹杰* 周雷声

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘要: 截止 2019 年年底, 中国民航现有固定翼运输类机队规模约 3 800 架, 发动机约 7 600 台, 以航线统计的发动机平均滑耗 0.23 夸脱/小时进行估算, 滑油年消耗量不少于 5 200 万夸脱, 估值约 7.9 亿元人民币。现阶段, 我国民用航空发动机滑油严重依赖进口, 显然不利于航空工业的健康成长。因此加速国产滑油适航取证并投入航线运营的工作, 不但能够解决我国民用客机长期对进口滑油的依赖, 更具备广阔的市场前景和经济战略价值。随着民用航空设备和部件的国产化进程加速, 国产滑油的技术指标已经达到同行业领先水平。由于国内现有民航飞机发动机均为国外制造, 同时受限于现行国际通用的民用航空滑油取证体系, 我国自主研制的滑油适航取证面临诸多困难。对民用航空发动机滑油投入航线运行前所需开展的鉴定试验进行研究, 用于支持和推进我国自主研制的滑油油料尽快投入航线使用。

关键词: 民用航空发动机; 滑油; 航线运行; 滑油适航取证

中图分类号: V211.74

文献标识码: A

OSID:



0 引言

根据 CAAC 最新发布的《适航审定部门年度报告-2019》显示, 截止 2019 年年底, 中国民航在役运输类机队规模约 3 800 架, 发动机约 7 600 台, 以航线统计的发动机平均滑耗 0.23 夸脱/小时进行估算, 平均每架机轮挡时间为 10 小时/天, 单架机年均飞行 300 天, 滑油年消耗量约 52×10^6 夸脱, 参考国内市场占比最大的美孚公司 Mobil Jet Oil-II 单价 150 元/夸脱, 仅滑油一项航空市场年采购额达 7.9 亿元人民币。且根据航空市场分析预测, 未来 20 年中国国内机队规模将增加至 12 000 架。因此加速国产滑油投入航线运营的工作, 不但能够解决我国飞机长期对进口滑油的依赖, 更具备广阔的市场前景和经济战略价值^[1]。

民用航空发动机滑油主要用于发动机传动系统部件如齿轮、轴承的润滑、冷却、防锈和密封, 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。我国自主研制的滑油技术指标已经达到同行业先进水平。但受限于现行国际通用的民用航空滑油取证规则, 适航取证面临诸多困难^[2]。本文对民用航空发动机滑油投入航线运行前所需开展的鉴定试验进行研究, 用于支持和推进我国自主研制的滑油油料尽快投入航线使用。

1 新研民用航空滑油适航审定程序

民用航空滑油的使用需满足民用航空规章的要求, 以中国民用航空条例 CCAR 为例: CCAR25.901(b)(1) 条款要求动力装置安装必须符合 CCAR33 部规定的安装说明书, CCAR33.7 条款要求发动机安装使用限制应包含滑油品级及规格, 并获得局方批准。发动机主制造商会将批准的滑油纳入发动机安装手册并以服务通告 (SB) 的形式正式发布, 下表 1 摘自 LEAP-1A-79-00-0001-00A, 规定了 LEAP-1A 发

* 通信作者. E-mail: zoujie1@comac.cc

引用格式: 邹杰, 周雷声. 民用航空发动机滑油投入航线运行前工程鉴定试验研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2022(2): 115-120. ZOU J, ZHOU L S. Certification method for civil turbine engine oil[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2022(2): 115-120(in Chinese).

动机允许使用的滑油^[3]。

表 1 LEAP-1A 发动机批准用油

滑油	制造商
Mobil Jet Oil- II (MJ II)	Exxon-Mobil
Eastman Turbine Oil 2197	Eastman
Eastman Turbine Oil 2380	Eastman
Mobil Jet Oil 254	Exxon-Mobil
TurboNycoil 600	Nyco
Aero Shell Turbine Oil 560	Shell

根据国际民用航空滑油的一般审定程序,新牌号滑油进入航线运行需完成 4 个阶段性工作,依次是滑油材料级验证试验、发动机台架试验、航线监控飞行试验和获得适航许可,流程如图 1 所示。下面将对各阶段主要工作和目标进行详细阐述。



图 1 新型滑油装机取证流程

SAE AS5780,在颁布之初即包括标准型(STD)和高温稳定型(HTS)滑油,并于 2005 年进行了修订换版。该标准在美军标 MIL-PRF-23699 基础上增加了发动机制造商实验室和台架测试要求,尤其加强了对产品质量保证体系的监管,如评定试验室资质、生产偏差、可追溯性、变更监控等。由于 AS5780 标准针对民用发动机高可靠性、长寿命等设计特点,具有更加严格的性能要求、质量控制和生产更改控制要求,目前美国联邦航空局 FAA 已在咨询通告 AC20-40C 中明确规定优选 AS5780 标准,并将完全取代 MIL-PRF-23699^[4-5]。

AS5780 要求新牌号滑油在指定试验室开展物理化学特性鉴定、稳定性、沉积性、摩擦性能试验和其他补充试验项,具体内容如下:

1) 物理特性鉴定

表 2 定义的物理特性如运动黏度(- 40 ℃、40 ℃ 和 100 ℃)、黏度稳定性、倾点、开口闪点、蒸发损失、泡沫特性、剪切安定性等项目指标需满足 AS5780 标准的要求。

表 2 物理特性

序号	特性	试验方法	实验室
1	运动粘度/mm ² ·s ⁻¹	ASTM-D445/IP71	
2	粘度稳定性, -40 ℃, 72 h 粘度变化/%	ASTM-D2532	
3	倾点/℃	ASTM-D97/IP15	
4	闪点/℃	ASTM-D92/IP36	lcor PetroLab
5	蒸发损失(204 ℃, 6.5 h)/wt%	ASTM-D972	
6	泡沫特性	ASTM-D892/IP146	
7	剪切安定性/%	ASTM-D2603(2)	

运动黏度是滑油的主要理化性能,合适的滑油黏度能够保证发动机的主轴承在承受更高的温度、转速和应力时得到有效润滑。

闪点是指在特定环境下,滑油蒸汽和外界空气形成混合气体在与明火接触时产生闪火并立刻燃烧的最低温度。闪点表征油品蒸发倾向和受热后的安定性,也能够反映出油品中含有的轻质馏分油品的质量浓度。

倾点和凝固点是指在试验条件下,将油品冷却到失去流动性(油面倾斜 45° 保持 1 min 油面不流动)的最高温度成为油的倾点或注点,一般情况下,

2 新研民用航空滑油适航鉴定试验

2.1 滑油材料级验证试验

民用航空发动机主要使用黏度为 5 mm²/s 的滑油,国际主流规范包括针对军民两用航空发动机的 MIL-PRF-23699 和仅针对民用航空发动机的 SAE AS5780。MIL-PRF-23699 标准由美国军方于 1966 年颁布,历经多次修订,随着发动机热负荷的持续增大,1997 年 F 版修订中在标准型(STD)的基础上增加了高温稳定型(HTS)滑油。2000 年,美国汽车工程师学会(Society of Automotive Engineers,简称 SAE)以 MIL-PRF-23699、英国国防部标准 DEF STAN 91-101 以及各发动机 OEM 内部标准为参照制订了航空燃气涡轮发动机润滑油的核心技术标准

油品的凝固点比倾点高 $2\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$,滑油的最低使用温度必须比倾点高 $5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

滑油的泡沫化易诱发发动机的滑油系统压力不稳定从而导致飞行事故,同时气泡在高压下破裂,产生的能量会对金属表面产生穴蚀。因此对航空润滑油来说,泡沫特性是航空润滑油非常重要的性能。

2) 化学特性鉴定

表3中定义的化学特性指标包括总酸值、沉积物/灰分含量、油品相容性、橡胶相容性、微量金属含量等项目需满足 AS5780 标准的要求。

表3 化学特性

序号	特性	试验方法	实验室
1	总酸值/ $\text{mg KOH} \cdot \text{g}^{-1}$	ARP 5088	
2	沉积物	FED-STD-791	
3	润滑剂相容性	FEDSTAN791 3403(2)	
4	橡胶相容性	FED-STD-791	Alcor PetroLab
	橡胶相容性	Def Stan 05-50	
5	24 h/120 h 后重量变化/%	(Part 61)	
6	微量金属含量	Metals Scan	

酸值是评定润滑油中有机酸含量的指标,以中和 1 g 润滑油所需要氢氧化钠或氢氧化钾的毫克量表示该油的酸值。酸值在使用油品中,表示油的精制深度,以及在使用中氧化变质的程度。油中的水溶性酸能够很快腐蚀机械设备,加快油品的变质,降低油品绝缘性能。

滑油与橡胶的相容性通常由橡胶制品浸泡在滑油环境中的体积和或硬度的变化程度来表征,对体积和或硬度的影响越小,表明两者的相容性越好。一般试验考核的对象是发动机密封常用的氟橡胶、丁腈橡胶等。

3) 稳定性能鉴定试验

表4中定义的包括氧化腐蚀安定性和热安定腐蚀性指标需满足 AS5780 标准的要求。

航空发动机滑油系统中的液体温度较高,正常工作温度在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。滑油一方面提供传动系统如主轴承和齿轮的润滑,同时还要迅速带走这些部件的摩擦热和来自高温区域的传递热量,要求滑油必须具有良好的抗高温腐蚀性、抗氧化安定性和热稳定性。

表4 稳定性能

序号	特性	试验方法	实验室
1	腐蚀与氧化稳定性 ($175\text{ }^{\circ}\text{C}$, 72 h, 83 mL 空气/min)	FED-STD-791 方法 5308	
2	腐蚀与氧化稳定性 ($204\text{ }^{\circ}\text{C}$, 72 h, 83 mL 空气/min)	FED-STD-791 方法 5308	Alcor PetroLab
3	腐蚀与氧化稳定性 ($218\text{ }^{\circ}\text{C}$, 72 h, 83 mL 空气/min)	FED-STD-791 方法 5308	
4	热稳定性、耐腐蚀性 ($274\text{ }^{\circ}\text{C}$, 96 h, 83 mL 空气/min)	FED-STD-791 方法 3411	
5	氧化稳定性	Def Stan 05-50 方法 9	Intertec (QinetiQ)

4) 化学沉积性能鉴定试验

滑油的沉积和结焦会加速高速轴承的磨损,造成航空发动机滑油系统滤网、油滤和喷嘴的堵塞,造成封严不可靠或影响传热造成温度过高而着火,通过表5中的轴承台架试验对滑油的沉积/结焦性能进行验证。

表5 沉积性能

序号	特性	试验方法	实验室
1	HLPS 动态结焦, $375\text{ }^{\circ}\text{C}$	ARP5996 Fed Std 791	Alcor PetroLab
2	ERDCO 轴承台架	方法 3410, Severity 1.5	US Navair

Erdco 轴承试验是评价滑油沉积性的有效方法,并已列入了各种润滑油规范。在该试验中,使用孔径 100 mm 的滚棒轴承,在 $2\text{ }270\text{ N}$ 径向负荷下,轴承供油量 0.6 L/min ,并向滑油箱通以 9.9 L/min 空气促进氧化,试验历时 100 h (以预定顺序每工作 24 h 停机 7 h ,或每工作 16 h 停机 4 h)后,以滑油的酸值、黏度变化以及轴承腔中的结焦情况和轴承破坏程度进行评估。

5) 摩擦性能鉴定试验

滑油在使用中的承载能力能够表征其润滑性能,通过表6的齿轮承载试验进行验证。

表6 摩擦性能

序号	特性	试验方法	实验室
1	齿轮承载能力	FED-STD-791 方法 6508	US Navair
2	承载能力,负荷级	SAE AIR 4978	Wedeven

滑油的润滑性能采用齿轮承载试验鉴定, 试验程序采用标准齿轮在特定负载、温度、喷油量下, 以一定负载时间和转速运行, 并逐级增加负载, 直至齿

轮失效时的最终负载来评价其润滑性。英国采用 IAE 齿轮进行试验, 美国采用 Ryder 齿轮进行试验, 试验方式如表 7 所示。

表 7 英/美滑油齿轮试验要素

	齿数		温度 / $^{\circ}\text{C}$	转速等级 / $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	试油流率 / $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	增加负荷 时间/min	评定手段
	主动轮	从动轮					
英国 IAE 齿轮	15	16	110	2 000 4 000 6 000	0.3	5	齿面破坏 60% 的负荷进行评定
美国 Ryder 齿轮	28	28	74	10 000	0.27	10	所有齿面的划伤、磨损平均面积达 22.5% 时的负荷

6) 其他增补试验项

AS5780 标准附录 A 推荐了按需进行附加试验科目, 包括酸组成、运动黏度 (200 $^{\circ}\text{C}$)、黏度指数、压粘系数、密度、比热、导热系数、电导率、气相结焦 (VPC) 等性能参数, 如表 8 所示。试验数据需提交 SAE 作为参考, 但不作为考核指标。

表 8 附录 A 要求的测试项目

序号	特性	试验方法	实验室
1	酸组成	FED-STD-791, 方法 3500	Intertec
2	黏度 $\text{mm}^2\text{s}@200\text{ }^{\circ}\text{C}$	ASTM D341	
3	黏度指数	ASTM D2270	
4	压力-黏度系数	Wedeven 方法	Wedeven
5	密度 (15 $^{\circ}\text{C}$)/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	ASTM D4052	Intertec
6	比热/ $\text{J} \cdot (\text{kg } ^{\circ}\text{C})^{-1}$	ASTM D2766 或 E1269	
7	热传导率	Holometrix	
8	电导率	ASTM D2624	
9	橡胶相容性	Snecma 方法	Snecma
10	水解稳定性@90 $^{\circ}\text{C}$	Def Stan 05-50 (part 61)	Intertec
11	371 $^{\circ}\text{C}$ 气相结焦 @ 371 $^{\circ}\text{C}$	ARP5921 (Draft)	US Navair
12	高温沉积	Alcor HTDT	Alcor PetroLab
13	苛刻磨损 WSD @ 20 kg 球荷/mm	AIR4978 appendix B	Intertec
14	中度磨损 WSD @ 20 kg 球荷/mm	AIR4978 appendix B	
15	热老化性能	Turbonmeca 方法	Turbonmeca
16	热老化性能 (225 $^{\circ}\text{C}$, 72 h)	Turbonmeca 方法	
17	微粒产生 (125 lb, 329 $^{\circ}\text{C}$, 18 h)/mg	Pressurized bomb test method	Pratt & Whitney

上述 6 类材料鉴定试验完成后应由实验室出具测试报告, 并给出试验结果是否符合标准的结论。试验结果获得 SAE E34 组织认可后被添加进入 AS5780 QPL 清单。AS5780 标准不仅规定了试验的标准测试程序和指标, 而且规定了指定的认证实验室, AS5780 标准认可具备滑油验证试验资质的大部分机构在美国, 其中部分实验室为美国军方所有。例如 SAE AS5780 规范中规定的 ERDCO 轴承台架试验 (验证滑油沉积性能)、Ryder 齿轮试验 (验证滑油摩擦性能) 和 VPC 气相结焦试验, 需在 SAE E34 组织认可的 US Navair 实验室内开展上述 3 项关键试验。三项关键实验室试验分别影响滑油高速齿摩擦轮承载能力评估、高压轴承摩擦碳沉积评估及高温气相积碳性能评估, 如图 2 所示^[4,10]。

为解决 AS5780 标准指定实验室可达性问题, CAAC 于 2019 年 10 月颁布了中国的民用航空滑油标准 CTSO-2C704《民用航空发动机滑油 (试行)》, 该标准在技术参数上与 SAE AS5780 完全一致并可以等效替代后者, 这一举措解决了实验室资质的问题。同时中国民航局积极筹建了 VPC 气相结焦实验室 (替代 AS5780 VPC 试验)、高温轴承沉积性能实验室 (替代 ERDCO 轴承试验) 和高速 FZG 齿轮实验室 (替代 Ryder 齿轮试验)^[6]。

2.2 发动机台架试验

基于工业界的惯例, 在某牌号滑油经 SAE E34 委员会批准认可并纳入 QPL 清单后, 发动机制造商还将在其目标型号发动机上开展台架试验和使用评估。

发动机台架试验采用单台发动机开展 3 000 个发动机循环的台架加减速试验, 试验方法可与 CCAR 33

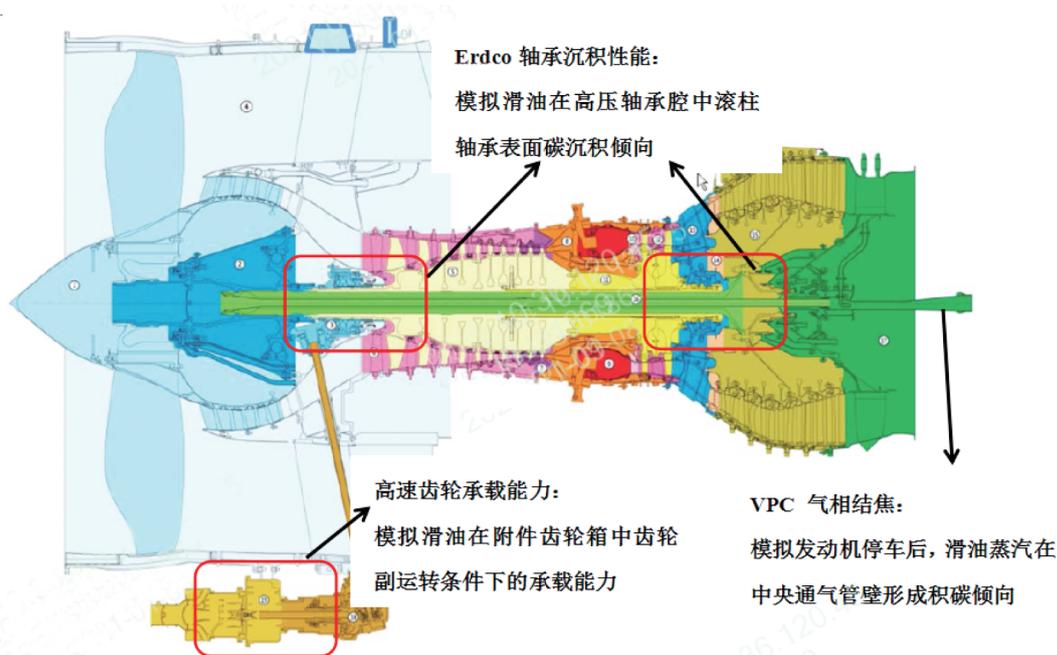


图2 AS5780认证的US Navair实验室试验科

部中定义的发动机耐久性试验保持一致,或直接结合发动机的耐久性试验开展。试验中对发动机滑油压力、温度、油量、滑油滤压差值进行实时监控,每500循环对测试滑油进行采样,查看滑油是否出现变质。试验完成后对发动机进行分解检查,检查试验发动机滑油系统相关部件如TCF滑油管路、滑油箱滤网、滑油滤、回油滤、AGB、TGB及其附件等是否有漏油、磨损等现象^[8-9]。

2.3 航线监控飞行试验

发动机台架试验通过安全性评估后,测试滑油随发动机服役,开展5 000 h的使用性能评估,考虑到飞行安全性,推荐仅一台发动机作为测试发动机加装测试滑油。整个过程中对发动机的监控和试验完成后对发动机分解检查程序同台架试验相同。

2.4 获得适航许可

完成滑油材料级验证试验、发动机地面台架试验和航线监控飞行试验后,发动机OEM向33部审查方提交滑油验证的相关符合性材料,33部审查方批准后,将新增滑油牌号列入发动机安装手册可用滑油牌号目录中。自此,新牌号滑油完成全部适航取证工作可用于航线服役。

3 结论

本文对国内民机滑油市场进行了分析和展

望,并详细介绍了民用航空发动机滑油投入航线运行前所需的工程鉴定试验和审定程序,得出以下结论:

1) 民用航空滑油具有广泛的市场和巨大的经济效益。实现国产润滑油航线上的应用,将增强我国基础材料的竞争力,提高我国民用航空的经济效益;

2) 新研滑油的适航审定包含滑油材料级验证试验、发动机台架试验、航线监控飞行试验和获得适航许可四个过程,上游试验为下游试验开展的前置。覆盖了基本物理、化学性质评估和装机试验评估等工作;

3) SAE AS5780是滑油材料级验证试验的国际通用依据,要求新研滑油在指定试验室开展物理、化学特性鉴定,沉积性能试验,摩擦性能试验,热稳定性性能试验和其他补充试验等6大类共30余项指标测试,是对滑油本身性质的全面评估。地面台架试验和飞行试验是对滑油和发动机匹配性和耐久性的综合评估;

4) 考虑到SAE AS5780指定实验室的可达性问题,为支持自主研发民用航空滑油的取证工作,CAAC颁布了等效替代SAE AS5780的CTSO-2C704《民用航空发动机润滑油(试行稿)》,同时建设了国内的等效替代试验台,这一举措解决了实验室资质的问题。

参考文献:

- [1] 中国民用航空局. 2018 年适航审定部门年度报告 [R]. 北京: 中国民用航空局, 2019.
- [2] 陈航, 马楷. SINOPEC Turbo Oil I 航空润滑油与 Mobil Jet Oil II 航空润滑油的相容性及国产化路径[J]. 合成润滑材料, 2020, 47(3): 36-40.
- [3] 中国民用航空局. 中国民用航空规章第 25 部 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
- [4] SAE. Specification for aero and aero-derived gas turbine engine lubricants; SAE AS 5780A [S]. U. S. : SAE, 2000.
- [5] NAVAL AIR WARFARE CENTER AIRCRAFT DIVISION. Lubrication oil, aircraft turbine engine, synthetic base, Nato Code Number O-156; MIL-PRF-23699 F [S]. [S. l. : s. n.], 1997.
- [6] 中国民用航空局. 民用航空发动机润滑油: CTSO-2C704[S]. 北京: 中国民用航空局, 2019.
- [7] 梅莉, 马楷. 合成航空润滑油规范的演变[J]. 合成润滑材料, 2018, 45(3): 8-11.
- [8] 周群. 国产航空发动机润滑油在国内民用飞机上的应用研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2011(2): 65-69.
- [9] 张丙伍, 吕丙琴, 李静, 等. 美国航空发动机油规格 SAE AS 5780 B 解读[J]. 石油商技, 2014, 32(4): 60-65.
- [10] 王毓民, 王恒. 润滑材料与润滑技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

作者简介

邹杰 男, 硕士, 工程师。从事飞机发动机系统集成设计工作。E-mail: zoujie1@comac.cc

周雷声 男, 硕士, 高级工程师。从事飞机发动机系统集成设计工作。E-mail: zhouleisheng@comac.cc

Certification method for civil turbine engine oil

ZOU Jie* ZHOU Leisheng

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: By the end of 2019, CAAC has a fixed-wing transport fleet of about 3,800 aircraft and about 7,600 engines. Based on the average engine consume of 0.23 quart / h, the annual oil consumption is no less than 52 million quarts, with an estimated value of about 790 million RMB. At present, domestic civil aviation engine lubricating oil is heavily dependent on imports, which is obviously not conducive to the healthy growth of the aviation industry. Therefore, accelerating the work of obtaining airworthiness certification of domestically-made lubricants and putting them into market can not only solve the long-term dependence of our civil aircraft on imported lubricants, but also have broad market prospects and economic strategic value. With the acceleration of the localization process of civil aviation equipment and components, the performance of domestically-made lubricants have reached the leading level in the same industry. Since the domestic civil aviation aircraft engines are all manufactured abroad and are limited by the current internationally accepted civil aviation oil certification system, domestic self-developed lubricants are facing many difficulties in obtaining airworthiness certification. This paper studies the qualification tests required for civil aviation engine lubricating oil before it is put into service, so as to support and promote the lubricating oil certification as soon as possible.

Keywords: civil engine; oil; entrance into service(EIS); certification of oil airworthiness

* Corresponding author. E-mail: zoujie1@comac.cc