

DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2017.02.026

活塞发动机航空润滑油适航性能验证技术研究*

曾萍^{1,2} 杨智渊^{1,2} 汪必耀^{1,2} 钱璟^{1,2} 夏祖西^{1,2}

(1. 中国民航局第二研究所 四川成都 610041; 2. 中国民用航空航油航化适航审定中心 四川成都 610041)

摘要: 在 SAE J1899 和 SAE J1966 的基础上, 分析国外活塞发动机航空润滑油适航审定技术验证的试验方法和步骤, 包括润滑油物理化学性能、稳定性、材料相容性、地面单缸台架、全尺寸台架试验和飞行试验评估方法及步骤, 为我国民航开展活塞发动机润滑油性能检测和研究工作, 以及国产活塞发动机润滑油的适航审定提供技术支持。

关键词: 航空活塞发动机; 台架试验; 润滑油; 适航

中图分类号: TE666; TH117 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-0150 (2017) 02-132-09

Study on Airworthiness Verification Technology of Aviation Piston Engine Lubricating Oils

ZENG Ping^{1,2} YANG Zhiyuan^{1,2} WANG Biyao^{1,2} QIAN Jing^{1,2} XIA Zuxi^{1,2}

(1. The Second Research Institute of CAAC, Chengdu Sichuan 610041, China;

2. Civil Aviation Fuel & Chemical Airworthiness Certification Center of CAAC, Chengdu Sichuan 610041, China)

Abstract: Based on SAE J1899 and SAE J1966, the test methods and procedures of airworthiness certification technology for the piston engine aviation lubricants were introduced, including chemical and physical property test of lubricants, stability test, compatibility with other oils and material, single cylinder engine test and full engine test, which provides the technical support for the corresponding test and research of piston engine lubricants in civil aviation and the airworthiness certification domestic piston engine lubricants.

Keywords: aviation piston engine; bench test; lubricants; airworthiness

航空润滑油是航空油料的一部分, 大量用于飞机发动机、起落架和机载设备等关键部件, 为发动机转子轴承和起落架提供润滑、冷却, 是飞机、发动机和机载设备上各系统不可缺少的功能材料。润滑油作为发动机系统使用最频繁的零件, 其在使用过程中会发生氧化、降解等反应, 导致洁净度、黏度、酸值等指标变化超过标准。变质的润滑油达不到理想的润滑效果, 固体颗粒与发动机元件表面会产生磨损, 造成润滑系统部件的损坏。

我国大部分通用航空活塞发动机润滑油依赖进口, 国外美孚、壳牌和伊士曼垄断了整个市场。出于保护核心技术的考虑, 西方国家对我国航空润滑油进行严密的技术封锁, 拒绝为中国油品进行实验, 造成国产航空润滑油无法获得 SAE (美国机动

车工程师协会) 的认证。随着我国民航行业规模的发展, 特别是低空领域的开放和通用航空的发展以及飞机、发动机等关键设备国产化进程的推进, 活塞发动机润滑油的使用量将逐年增加。因此, 为使国产航空润滑油能顺利获得 SAE 认证, 做好国产润滑油产品性能和相容性评估, 开展与民航发展相适应的适航验证技术研究, 为保证我国民航飞行安全的具有重要意义。

1 活塞发动机航空润滑油国内外管理体系

目前国外管理局如美国联邦航空局 (FAA) 和欧洲航空安全局 (EASA) 等为保障航空润滑油的适航性, 依托于 SAE 建立了一套相对完善的认证体系和批准程序, 如 PD2104 等认证程序文件。SAE 成立了航空润滑油认证小组, 包括 FAA、飞机和发动机制造厂商 (OEM) 以及油料制造厂商均在该小组内, 并通过 SAE 和美国海军 (USNV) 认证试验室对产品进行技术验证, 航空润滑油的性能须符合 SAE J1899 和 SAE J1966。通过 SAE E34 的认证后, 才能列入合格产品清单, 最终获得飞机和发动机制造商

* 基金项目: 2014-2015 年度民航局安全能力建设基金项目 (2014026145)。

收稿日期: 2016-03-22

作者简介: 曾萍 (1985—), 女, 硕士, 工程师, 从事航空化学和航空润滑油研究。E-mail: zengping@fccc.org.cn.

(OEM) 的批准。目前，OEM 批准了壳牌、美孚和伊士曼等几个公司的润滑油，中国国产航空润滑油尚未获得批准。

目前，我国并未建立起航空润滑油产品性能认证体系和标准体系，也未获得工业部门或行业协会的技术支持。随着飞机、发动机等国产化进程的推进，为保障其安全运行，其附属航空润滑油和液压油的适航审定也亟待解决。按照中国现有的管理体系和性能试验验证能力，远远不能满足这一需求。我国应基于国外航空润滑油产品技术标准规定，研究产品性能验证技术难点，制定活塞发动机航空润滑油标准体系，通过完整的实验数据获取国际协会和飞机和发动机制造商（OEM）的批准。

2 活塞发动机航空润滑油技术规定

目前国际上通用的航空活塞发动机润滑油技术标准包括 SAE J1966 和 SAE J1899，分别针对发动机出

厂磨合阶段 50 h 用油和日常用油进行技术指标规定，详见表 1。SAE J1966 标准是由美国汽车工程师协会制定并颁布，用于取代原 MIL-L-6082 标准，该标准规定了无分散剂矿物油型四冲程往复式航空活塞发动机润滑油的技术要求，从物理化学性能、L-38 单缸发动机台架 2 个方面规定了产品技术要求。SAE J1899 标准用于取代原 MIL-L-22851 标准，该标准规定了含分散剂矿物油型（或合成油）四冲程往复式航空活塞发动机润滑油的技术要求，从 4 个方面严格规定了润滑油的性能参数，即分别为待测润滑油品的物理化学性能要求，40 h 序列Ⅷ单缸发动机台架的试验性能要求，150 h 莱康明 TIO-540-J2BD 全尺寸发动机台架的试验性能要求，以及 500 h 飞行（至少两架飞机分别搭载莱康明发动机与大陆发动机）评估试验要求。

表 1 含分散剂和无分散剂活塞发动机润滑油技术要求

Table 1 Containing dispersants and dispersant piston engine lubricating oil technical requirements ashless dispersant and non-ashless dispersant

试验类型	SAE J1966 润滑油		SAE J1899 润滑油	
	项目	方法	项目	方法
物理化学性能	16 项	SAE J1966	18 项	SAE J1899
单缸台架试验	L-38 发动机	ASTM D6709	序列Ⅷ发动机	ASTM D6709
全尺寸台架试验	不测试	/	莱康明 TIO-540-J2BD 发动机	SAE J1899 附录 B
飞行试验	不测试	/	莱康明和大陆发动机	SAE J1899 附录 C

2.1 活塞发动机润滑油物理化学性能评估

SAE J1966 针对发动机出厂磨合阶段 50 h 用油，该类润滑油基础油是矿物油，不含添加剂以增加磨合效果。SAE J1899 为针对日常用油的技术标准，该类润滑油基础油是石油馏分或合成组分或两者的混合物，并加入功能性添加剂如分散剂、抗氧剂、抗泡剂、黏度指数改进剂、降凝剂等以满足特定要求。由于以上两类油品在原材料、添加剂、使用功能上的差别，二者在物理化学性能测试项目的技术指标和试验项目等方面有一定差异，SAE J1966 类润滑油无需测试其与橡胶材料的相容性以及痕量金属含量，产品倾点和高温剪切黏度值均比 SAE J1899 范围大，详见表 2。表 2 中黏度、黏度指数、闪点、倾点、硫含量、

高温高剪、灰分含量、密度等项目在评估润滑油抗剪切稳定性、低温启动性能、发动机清洁、烟炱控制和燃油经济性等方面具有指导意义。润滑油黏度指数高（黏度随温度变化小），低温流动性好且高温黏度保持力强；倾点低则具有挥发性低、热氧安定性好和毒性低等特点。此外，目前大多采用阴离子聚合工艺制造黏指剂，严格控制分子量，具有较窄的分子量分布，兼顾增稠效率和剪切稳定性，可减少润滑油中高聚物的用量，从而改善发动机沉积物。表 2 中橡胶材料相容性测和铜片腐蚀主要用于评估润滑油对金属材料相容性和橡胶材料的腐蚀，防止飞机发动机密封圈等橡胶材料发生膨胀或体积变小导致飞机燃油混入润滑油等不安全事故发生。

表 2 SAE J1966 和 SAE J1899 润滑油物理化学性能

Table 2 Physical and chemical properties of lubricating oil in SAE J1966 and SAE J1899

试验项目	试验方法	SAE J1899 技术指标	SAE J1966 技术指标
黏度(100 ℃) $\nu/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$		需测试	需测试
SAE 30grade	ASTM D445	9.3 ~ 12.5	9.3 ~ 12.5
SAE 40grade		12.5 ~ 16.3	12.5 ~ 16.3
SAE50grade		16.3 ~ 21.9	16.3 ~ 21.9
SAE 60grade		21.9 ~ 26.1	21.9 ~ 26.1
多级别		满足 SAE J300 要求	满足 SAE J300 要求
黏度指数		需测试	需测试
SAE 30grade	ASTM D2270	≥ 100	所有级别 ≥ 85
SAE 40grade		≥ 100	
SAE50grade		≥ 95	
SAE 60grade		≥ 95	
多级别		≥ 100	
闪点 $t/^\circ\text{C}$		需测试	需测试
SAE 30grade	ASTM D92	≥ 220	≥ 220
SAE 40grade		≥ 225	≥ 225
SAE50grade		≥ 243	≥ 243
SAE 60grade		≥ 243	≥ 243
多级别		≥ 220	≥ 220
闪点 $t/^\circ\text{C}$		需测试	需测试
SAE 30grade	ASTM D93	Report	Report
SAE 40grade		Report	Report
SAE50grade		Report	Report
SAE 60grade		Report	Report
多级别		Report	Report
倾点 $t/^\circ\text{C}$		需测试	需测试
SAE 30grade	ASTM D97	≤ -24	≤ -18
SAE 40grade	ASTM D5949	≤ -22	≤ -15
SAE50grade	ASTM D5950	≤ -18	≤ -12
SAE 60grade	ASTM D5985	≤ -18	≤ -9
多级别		—	—
硫含量 $w/\%$		需测试	需测试
SAE 30grade	ASTM D129	≤ 0.6	≤ 0.6
SAE 40grade	ASTM D1552	≤ 0.8	≤ 0.8
SAE 50grade	ASTM D2622	≤ 1.0	≤ 1.0
SAE 60grade	ASTM D4951	≤ 1.2	≤ 1.2
多级别	ASTM D5185	≤ 0.6	≤ 0.6
黏度(高温高剪, 150 ℃) $\nu/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$		需测试	需测试
SAE 30grade	ASTM D4683 ASTM D4741	≥ 2.9	≥ 3.3
SAE 40grade		≥ 3.7	≥ 3.7
SAE 50grade		≥ 3.7	≥ 3.7
SAE 60grade		≥ 3.7	≥ 3.7
多级别		满足 SAE J300 要求	满足 SAE J300 要求
以下试验项目 SAE 30/40/50/60 和多级别润滑油均需测试			

续表 2

试验项目	试验方法	SAE J1899 技术指标	SAE J1966 技术指标
黏度(40 ℃) $\nu/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	ASTM D445	Report	Report
酸指数 $c/(\text{mg KOH} \cdot \text{g}^{-1})$	ASTM D664	≤ 1.0	≤ 0.1
密度(15 ℃) $\rho/(\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	ASTM D4052	Report	Report
	ASTM D1289	Report	Report
灰分含量 $w/\%$	ASTM D482	≤ 0.011	≤ 0.011
	SAE J1787		
微量沉积物 $V/(\text{mL} \cdot (100 \text{ mL}^{-1}))$	ASTM D2273	≤ 0.005	≤ 0.005
铜片腐蚀 等级		需测试	需测试
3 h 100 ℃	ASTM D130	≤ 1	≤ 1
3 h 204 ℃		≤ 3	≤ 3
泡沫稳定性		需测试	需测试
Seq. I / II / III 泡沫体积	ASTM D892	$\leq 50 \text{ mL}$	$\leq 50 \text{ mL}$
油品相容性	ASTMD6922	无沉淀	无沉淀
弹性体相容性试验		需测试	不需测试
体积膨胀率% 72 h			
AMS3217/1 橡胶(70 ℃)	FTM 791/3604	-5 ~ +10	/
AMS3217/4 橡胶(150 ℃)		-5 ~ +5	/
AMS3217/5 橡胶(302 ℃)		-5 ~ +5	/
硅橡胶(121 ℃)		0 ~ +20	/
痕量金属含量 $w/10^{-6}$		需测试	不需测试
Fe、Ag、Al、Cr、Cu、Mg、Mo、Ni、Pb、 Si、Sn、Ti、Zn	SAE J1899/4. 5. 2	≤ 5 、 ≤ 2 、 ≤ 7 、 ≤ 5 、	
		≤ 3 、 ≤ 3 、 ≤ 4 、 ≤ 3 、	/
		≤ 5 、 ≤ 25 、 ≤ 10 、 ≤ 2 、 ≤ 10	

橡胶相容性试验分为体积测定法和质量测定法，SAE J1899 和 SAE J1966 中均采用 FED-STD-791，Method 3604 的体积测定法，具体方法如下：

(1) 先将符合材料规范的三片橡胶片依次用清水、蒸馏水以及溶剂（无水乙醇与乙醚混合液）清洗干净，晾干后备用。

(2) 在 $(24 \pm 3)^\circ\text{C}$ 下，用称量精度为 1 mg 的底部带有挂钩的分析天平称量已清洁干净的橡胶片在空气中的质量 m_1 。然后将玻璃烧杯盛满蒸馏水放在分析天平的正下方，将已经组装好的橡胶片浸入烧杯中，橡胶片必须完全浸没，并且蒸馏水液面要高于橡胶片上顶面约 5 mm，称量此时橡胶片的质量 m_2 。

(3) 用滤纸擦干橡胶片，然后用不锈钢丝将其串在一起并适当隔开，自由悬挂在盛有润滑油的玻璃杯中，润滑油的体积应至少是橡胶片总体积的 15 倍（润滑油的体积约为 370 mL），以保证橡胶片完全浸没。用磨口塞把玻璃油杯口塞住，并放入恒温浴中，在温度 $(70 \pm 3)^\circ\text{C}$ 、 $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$ 、 $(302 \pm 3)^\circ\text{C}$ 下试

验 72 h，并注意在试验过程中应使橡胶片避光。

(4) 试验结束后，将玻璃油杯取出，迅速将橡胶片转移到实验室温度下的新鲜油料中冷却，历时不少于 30 min，不多于 60 min。取出试片，先在工业乙醇（或橡胶工业用溶剂）中冲洗 20 s，以除去表面多余的油料，再用滤纸擦干，然后在空气中称量试片的质量 m_3 ，然后再在实验室温度下的蒸馏水中称量质量 m_4 ，精确至 mg。

(5) 试验结果处理：

体积变化百分数 $\Delta V(\%)$ 按下式进行计算：

$$\Delta V = [(m_3 - m_4) - (m_1 - m_2)] / (m_1 - m_2) \times 100\%$$

式中： m_1 为橡胶片在空气中的初始质量，mg； m_2 为橡胶片在水中的初始表观质量，mg； m_3 为橡胶片侵油后在空气中的质量，mg； m_4 为橡胶片侵油后在水中的表观质量，mg。

试验结果取 3 个橡胶片结果的平均值。

2.2 航空活塞发动机润滑油单缸台架评估

润滑油在完成特殊理化性能评估之后，一般还需

进行模拟台架试验，包括一些发动机试验，完成实验验证后方能投入使用。目前，润滑油常用梯姆肯环块试验机、FZG 齿轮试验机、法莱克斯试验机和滚子疲劳等试验机进行评定油品的耐极压负荷的能力或抗磨损性能。航空活塞发动机润滑油要求完成物理化学性能验证后，首先开始 40 h 的发动机单缸台架模拟实验，以评估润滑油的润滑性能和抗磨性能。试验采用化油器式、火花点火协同润滑研究（CLR）油试验发动机（该试验方法中也称为序列 VIII 试验发动机，台架示意图如图 1 所示）加注无铅燃料执行试验程序，模拟在单缸发动机苛刻运行情况下评定油品对发动机的保护，以及在高温和恶劣工况下油品的润滑性能和抗磨损性能。其判断的标准主要包括试验后对单缸发动机台架进行拆卸，称量磨损物的质量，检测关键部件的磨损情况，测试油品黏度和酸值的变化，考察油品的性能变化情况，具体指标限制见表 3。

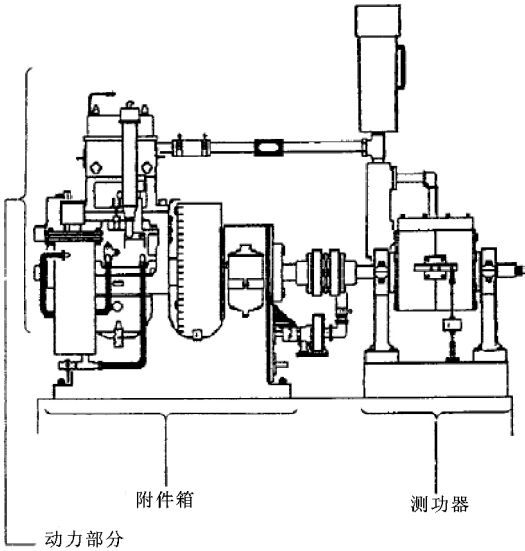


图 1 典型序列 VIII 发动机试验台示意图

Fig 1 Engine test bench of typical sequence VIII

表 3 航空活塞发动机润滑油单缸台架性能要求

Table 3 The requirement of single cylinder engine test for lubricating oil of aircraft piston engine

单缸台架试验项目	测试方法	SAEJ1899 技术要求	SAE J1966 技术要求
腐蚀物重量 m/mg	ASTM D6709	≤ 500	≤ 500
黏度变化(40℃) $\Delta\nu/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	ASTM D445	单级油: $-15 \sim 10$ 多级油: ≤ 10	单级油: $-5 \sim 10$ 多级油: ≤ 10
黏度(100℃) $\nu/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	ASTM D445	单级油: 无要求 多级油: 与原值一致	单级油: 无要求 多级油: 与原值一致
酸值变化 $c/(\text{mg KOH} \cdot \text{g}^{-1})$	ASTM D664	≤ 2	≤ 2

每次序列 VIII 发动机油试验之前，应彻底清洁 CLR 油品试验发动机的动力部分，并对动力部分的部件进行检测。安装新活塞或清洁旧活塞，安装一整套新活塞环、一套新铜-铅连杆试验轴瓦，以及其他规定的部件，并用标准油品对单缸模拟台架系统进行校准，校准后按照以下步骤进行试验：

- (1) 动力部分安装在附件箱/试验台上，试验采用无铅燃料；
- (2) 根据表 4 中的磨合条件使发动机先运行 4 h；
- (3) 然后按照表 5 规定的条件使发动机运转 40 h；
- (4) 在试验条件下每隔 10 h 取一份油样。如果对多级黏度油品进行试验，所取的样品用于确定受试

油品的稳定性能力。

- (5) 试验结束后，测定轴承质量损失，考察动力部件、活塞、活塞环、连杆等磨损情况。

表 4 磨合条件

Table 4 The experimental condition of break-in running test

转速 $n/$ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	功率 P/W	点火提前角 (BTDC) $\varphi/(\text{°})$	时间 t/min	总时间 t/h
$1\,500 \pm 25$	$1\,500 \pm 150$	25 ± 1	60 ± 2	1
$2\,000 \pm 25$	$3\,000 \pm 150$	25 ± 1	60 ± 2	2
$2\,500 \pm 25$	$3\,700 \pm 150$	35 ± 1	60 ± 2	3
$3\,150 \pm 25$	$3\,700 \pm 150$	35 ± 1	60 ± 2	4

表 5 单缸台架试验条件

Table 5 The experimental condition of single cylinder engine test

项 目	设定值
转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	$3\,150 \pm 25$
功率 P/W	调节功率,使燃料流量 匹配规定空气-燃料比
燃料流量 $q/(kg \cdot h^{-1})$	2.25 ± 0.11
空气-燃料比	13.43 ± 0.5
水套出口冷却液温度 $t/^{\circ}C$	93.5 ± 1
水套入口和出口冷却液温差 $t/^{\circ}C$	5.6 ± 1
油道油温 $t/^{\circ}C$	
SAE 0W、5W、10W	135 ± 1
SAE 20、30、40、50 和多级黏度油	143.5 ± 1
点火提前角 BTDC $\delta/(^{\circ})$	35 ± 1
油压 p/kPa	276 ± 14
曲轴箱真空度 p/Pa	500 ± 120
排气背压 p/Pa	$0 \sim 3.4$
曲轴箱废气 $V/(L \cdot h^{-1})$	850 ± 28
漏气量 $V/(L \cdot h^{-1})$	记录值

2.3 航空活塞发动机润滑油全尺寸台架评估

航空活塞发动机润滑油单缸台架试验不能很好地表征润滑油日益苛刻的使用性能，需进一步使用全尺寸的台架试验，将润滑油在选用的全尺寸发动机上，按标准化条件进行长时间的运行后，评定其耐久润滑性能和耐久抗磨损性能。发动机台架试验的结果是判定润滑油质量等级的依据，对于润滑油特别重要。活塞发动机润滑油按照 SAE J1899 附录 B 和美国联邦航空局规章 FAR 33.49 要求，采用 Lycoming Engines TIO-540-J2BD 发动机以及发动机悬挂系统、螺旋桨等设备，并规定试验过程中使用 100LL 航空汽油，经过试运行、校准运行、滑油消耗、耐久试验等阶段。完成前期试验后，更换新的测试用油和油滤，进行 150 h 的耐久性试验。试验完成后采集样品，检测润滑油黏度、总酸值和微量金属含量、碳沉积、油样降解情况。试运行和校准运行需从 1 200 ~ 2 575 r/min 进行定时定压运转，润滑油消耗量不超过 0.95 L/h。

2.3.1 试验设备

(1) 发动机:

①TIO-540-J2BD 由 Textron 公司制造，为风冷、涡轮增压、活塞式内燃机。

②该发动机装备有一连续流动式燃料喷射系统，使用航空汽油，最小辛烷值为 100。

③该发动机为六缸对置式，排量 8 873.6 cm³。在临界高度 4 626 m 最大功率 257 kW。

④发动机带有一个容量为 11.36 L 的湿式润滑油箱。

⑤发动机附件包括：燃料泵、起动机、交流电机，还附加 2 个额外驱动器（Drives），但在试验时不必加载。

(2) 试验台：试验台包括的航空型 Dynafocal 发动机装备系统为 Piper 公司生产，型号为 01272-2，与 Piper PA31-350 相同或相当。该系统然后连接到适当的试验台上。

(3) 动力吸收器：发动机直接驱动连在曲轴上的螺旋桨。对于该试验装置，用一个飞行螺旋桨来吸收动力。该螺旋桨为三叶片可变斜度型，由 Hartzell 公司生产，型号为 HC3YR-2UF/FC8468。在连接螺旋桨时使用 F624Z Hartzell 螺旋桨调速器或类似设备。

(4) 仪表:

①试验地点应当配备必需的测量装置和相应的硬件以记录所需的数据。系统通过热电偶、压力计、流量计、转速计获取数据。装置上还应该配备警报和控制系统，以利于机器的安全操作。

②在整个试验中，应定期记录试验数据，包括试车阶段、试验校正前和校正后、机器寿命试验以及对应的润滑油消耗试验的数据。

(5) 燃料：所有的试验都应使用按照 ASTM D910 标准生产的 100LL（最低辛烷值）级航空燃料。

2.3.2 实验步骤

(1) 发动机按照表 6 中设定的参数进行运行，按照表 7 进行 150 h 耐久试验。试验之前，应用原发动机零件组装发动机。在组装时应测量所有的关键部件，测量的尺寸应与试验后尺寸进行比较，以确定磨损量。试验总时间为 150 h，应做记录发动机每天情况的日志。

表 6 全尺寸台架试验参数

Table 6 The parameter condition of full size engine test

参数	识别标记	范围	限值
温度 $t/^{\circ}\text{C}$			
进入油腔润滑油	TIS	0 ~ 204	不大于 118
冷凝器出口润滑油	TOO	0 ~ 260	记录
压缩机进口空气	TAI	0 ~ 102	0 ~ 40
压缩机出口空气	TATE	0 ~ 260	不大于 260
试验单元空气	TATC	0 ~ 102	0 ~ 40
废气涡轮增压器进口	TETI	0 ~ 1 020	不大于 899
气缸头 (每一气缸)	TCH (1 - 6)	0 ~ 408	不大于 260
燃料进口	TFI	0 ~ 200	不大于 51
压力 p/MPa			
发动机腔润滑油	POEG	0 ~ 1.38	0.38 ~ 0.66
发动机泵出口润滑油	POPE	0 ~ 2.07	记录
过滤器出口润滑油	POFO	0 ~ 1.38	记录
设定位置处歧管干燥空气)	PAM	0 ~ 0.69	不大于 0.34
试验单元气压计空气	PBTC	0 ~ 0.28	记录
燃料泵进口燃料	PFUP	0 ~ 1.38	-0.014 ~ 0.45
流量			
燃料 $w/(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$	FF	0 ~ 135	不大于 112.5
转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$			
发动机	ERPM	0 ~ 4 000	不大于 2 575
其他			
试验时间 t/h	TET	0 ~ 200	150
试验时间 t/h	TOT	0 ~ 200	

表 7 150 h 耐久试验条件

Table 7 The test condition of 150 h engine endurance test

试验周期	积累时间 t/h	循环数/周期	循环时间 t/h	功率 P/kW	转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	油温 $\theta/^{\circ}\text{C}$	燃料流量 $w/(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$
1	0 ~ 30	10	0.08	257	2 575	78 ~ 136	108 ~ 112.5
			0.08	154	2 200	78 ~ 136	86 ~ 90
2	30 ~ 50	4	2.5	257	2 575	119 ~ 125	108 ~ 112.5
			2.5	154	2 200	119 ~ 125	38 ~ 41
3	50 ~ 70	10	1.5	257	2 575	119 ~ 125	108 ~ 112.5
			0.5	193	2 340	78 ~ 136	58 ~ 61
4	70 ~ 90	10	1.5	257	2 575	130 ~ 136	108 ~ 112.5
			0.5	180	2 290	78 ~ 136	54 ~ 56
5	90 ~ 110	10	1.5	257	2 575	130 ~ 136	108 ~ 112.5
			0.5	168	2 240	78 ~ 136	46 ~ 49
6	110 ~ 130	10	1.5	257	2 575	130 ~ 136	108 ~ 112.5
			0.5	154	2 180	78 ~ 136	38 ~ 41
7	130 ~ 150	10	1.5	257	2 575	130 ~ 136	108 ~ 112.5
			0.5	129	2 050	78 ~ 136	35 ~ 38

(2) 在 150 h 耐久性试验前, 应当进行磨合、润滑油消耗运行和校正运行。这些运行的时间不包括在 150 h 试验时间内。在 150 h 试验中非试验性时间加上其前、后运行时间和其他运行时间累计起来不应超过 20 h, 所有其他运行时间应该记录在册。

(3) 150 h 试验完成后发动机应进行试验后的校正运行。在该时间内机器发生的任何性能变化(在试验中出现过的)都应测定和记录。

(4) 整个试验过程中应定期检查润滑油的性能, 以确定润滑油的变质情况。

(5) 试验后应用肉眼检查发动机硬件, 描述和记录化油器上的沉积物, 测试关键部件尺寸, 与测试前对比, 判断是否超过发动机大修可接受的磨损范围。关键部件包括曲轴主体和连杆、轴承主体和杆内径、挺杆孔与外套内径、挺杆主体外径、挺杆销组合和主体、凸轮轴轴颈和孔径、连杆轴衬内径和活塞销孔内径等。

2.4 飞行试验评估

完成航空活塞发动机润滑油物理、化学、稳定性、材料相容性、地面单缸台架和全尺寸台架试验评估后, 还需在非军用飞机上(Lycoming Engines 和 Teledyne Continental Motors 发动机各一个)进行飞行评估, 每个发动机在实际运行环境中进行飞行持久性测试时间不低于 500 h, 并对飞行数据进行实时监控记录。试验完成后, 需检测润滑油的黏度、总酸值和微量金属含量, 报告油料状态、消耗、过滤沉积物、压力, 对发动机进行拆卸, 检测滤嘴的碳沉积和关键部位的磨损程度等, 并按照发动机手册要求判断磨损情况是否超过发动机大修可接受的磨损范围。

2.4.1 试验设备

(1) 发动机: 飞行评价最少在 2 台增压发动机上进行。1 台发动机是 Textron-Lycoming 公司生产的, 另一台由 Teledyne-Continental 公司制造。试验用的发动机应该是新的或刚大修过的。但是, 大修后总时间不超过 200 h 的发动机才能接受。

(2) 螺旋桨: 飞行评价中使用的所有发动机应安装了油压可调斜度螺旋桨。安排适当的螺旋桨工作条件, 以便在使用单元内进行润滑油性能评价。

2.4.2 实验步骤

(1) 在整个评价期间记录所有飞行评价时发动机的润滑油消耗量和润滑油性能数据, 并在试验完成时汇总。以 (50 ± 5) h 间隔取大约 475 mL 油样。取样应在新鲜油被加到发动机之前、发动机关机 1.5 h 内取样。油样分析指标包括 100 °C 黏度和总酸值。另外, 样品还将进行光谱分析, 检查其中磨损金属的

含量。

(2) 换油应按照发动机制造商的推荐进行。每次换油时, 检查和更换润滑油滤清器。

(3) 所有标准发动机的维修记录装订成文件, 在评价期间都能查阅。

(4) 在试验过程中, 对每一台发动机从开始, 到结束大约间隔 100 h, 进行压力差检查并作记录。

2.4.3 检查要求

(1) 在预定操作周期完成后, 发动机分解到需要的程度, 测量机器零件。关键尺寸、容许值和磨损限度应达到发动机制造商大修要求。

(2) 在进行清洗和测量之前, 分解开的零件应拍成彩色照片, 并按照评价手册对他们的状况进行评级, 任何润滑油造成的沉积物都应拍照和记录。

(3) 可变斜度螺旋桨应分解到可以用肉眼评价活动机构和密封装置润滑油的变化程度。

(4) 用肉眼检查飞行评价中换掉的过滤器单元和/或滤网上的磨损碎片、碳质材料。如果有非正常情况, 记录其状况。

(5) 定期抽出的油样应标示飞机型号、注册号、发动机型号、序列号、发动机总运行时间、润滑油试验时间、润滑油证明、抽样日期。定期抽取的润滑油试样应测定黏度和总酸值。

(6) 应报告项目中每一台发动机完整的磨损金属光谱分析结果。对于使用过的油的数据仅仅用作发动机工作情况监测和润滑油磨损性能信息。

3 产品认证

按照 SAEJ1899 和 SAEJ1966 规定完成航空活塞发动机润滑油物理、化学、稳定性、材料相容性、地面单缸台架、全尺寸台架试验和飞行试验评估后, 提交完整的试验报告和数据记录至审查机构, 经过逐项核对和评估后完成润滑油的适航认证工作。同时标准规定, 当润滑油基础油和添加剂的纯度、来源、组分以及制造商发生变更时, 需重新进行产品认证; 当润滑油、基础油和添加剂生产商的生产地址、生产工艺发生变更时, 也需重新进行产品认证。

4 结束语

随着我国制造业的发展, 国产化政策已成为我国基本产业政策, 推进航空润滑油和液压油国产化是必然的趋势, 也是我国民航强国战略的一部分。然而, 近年来在国产润滑油产品认证过程中, 国产润滑油受到了西方国家的技术封锁, 美国海军实验室拒绝为非北约国家油品进行试验, 造成了我国航空润滑油无法获取实验数据, 国产化遇到了重大困难和限制。目前, 我国在开展航空活塞发动机润滑油适航验证程序

的同时,应加强认证中所涉及的物理、化学、稳定性、材料相容性、地面单缸台架和全尺寸台架等性能试验研究,搭建一个符合国际标准和条件的机构和平台,具备完整的航空活塞发动机润滑油适航验证能力,推动我国润滑油产品完成适航验证。

具备完整的航空活塞发动机润滑油适航验证能力将解决困扰和制约我国航空润滑油适航取证的问题,打破美孚、壳牌油品的市场垄断,促进航空润滑油国产化,从根本上摆脱欧美国家的技术壁垒和制约,保障国家战略安全,保障航空业持续安全运行;同时,将促进航空制造业配套产业的发展,在民用航空领域内开拓一个航空润滑油新兴产业,从而对国家经济发展和战略实施起到促进作用。

参考文献

- 【1】Lubricating oil aircraft piston engine (ashless dispersant): SAE J1899 [S]. Warrendale: SAE 2011.
 - 【2】Lubricating oils ,aircraft piston engine(non-dispersant mineral oil): SAE J1966 [S]. Warrendale: SAE 2005.
 - 【3】Standard test method for evaluation of automotive engine oils in the sequence viii spark-ignition engine (CLR oil test engine): ASTM. ASTM D 6709 [S]. Philadelphia: ASTM 2014.
 - 【4】Standard test method for measuring viscosity of new and used engine oils at high shear rate and high temperature by tapered bearing simulator viscometer at 150 °C: ASTM. ASTM D4683 [S]. Philadelphia: ASTM 2013.
 - 【5】ASTM. Standard test method for determination of yield stress and apparent viscosity of engine oils at low temperature: ASTM D4684 [S]. Philadelphia : ASTM 2014.
 - 【6】METRIC FED-STD-791D November 6 [S]. 2007.
 - 【7】Standard test method for apparent viscosity of engine oils and base stocks between - 5 °C and - 35 °C using cold-cranking simulator: ASTM D5293 [S]. Philadelphia: ASTM 2014.
 - 【8】Standard test method for measuring apparent viscosity at high-temperature and high-shear rate by multicell capillary viscometer: ASTM D5481 [S]. Philadelphia: ASTM 2013.
 - 【9】Automatic sampling of petroleum and petroleum products: ASTM D 4177 [S]. Philadelphia: ASTM 2013.
 - 【10】Measuring viscosity at high temperature and high shear rate by tapered bearing simulator: ASTM D 4683 [S]. Philadelphia: ASTM 2014.
 - 【11】Determination of yield stress and apparent viscosity of engine oils at low temperature: ASTM D 4684 [S]. Philadelphia: ASTM 2013.
 - 【12】Measuring viscosity at high temperature and high shear rate by tapered-plug viscometer: ASTM D 4741 [S]. Philadelphia: ASTM 2012.
 - 【13】Elemental analysis of lubricant and additive components—barium ,calcium ,phosphorus ,sulfur ,and zinc by wavelength—dispersive X-ray fluorescence spectroscopy: ASTM D 4927 [S]. Philadelphia: ASTM 2013.
 - 【14】Determination of additive elements in lubricating oils by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy: ASTM D 4951 [S]. Philadelphia: ASTM 2012.
 - 【15】Determination of additive elements ,wear metals ,and contaminants in used lubricating oils by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy: ASTM D 5185 [S]. Philadelphia: ASTM 2014.
 - 【16】Trace sediment in lubricating oils: ASTM D 2273 [S]. Philadelphia: ASTM 2011.
 - 【17】Sulfur in petroleum products (X-ray spectrographic method): ASTM D 2622 [S]. Philadelphia: ASTM 2012.
 - 【18】Density and relative density of liquids by digital density method: ASTM D 4052 [S]. USA: ASTM 2014.
 - 【19】Manual sampling of petroleum and petroleum products: ASTM D 4057 [S]. Philadelphia: ASTM 2012.
-
- (上接第 131 页)
- 【44】任露泉 ,王再宙 ,韩志武. 仿生非光滑表面滑动摩擦磨损试验研究[J]. 农业机械学报 ,2003 34(2) : 86 - 88.
REN L Q ,WANG Z Y ,HAN Z W. Experimental research on sliding wear of bionic nonsmoothed surface [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery ,2003 34(2) : 86 - 88.
 - 【45】韩志武 ,任露泉 ,刘祖斌. 激光织构仿生非光滑表面抗磨性能研究[J]. 摩擦学学报 ,2004 24(4) : 289 - 293.
HAN Z W ,REN L Q ,LIU Z B. Investigation on anti-wear ability of bionic nonsmooth surfaces made by laser texturing [J]. Tribology ,2004 24(4) : 289 - 293.
 - 【46】SUN N ,SHAN H ,ZHOU H et al. Friction and wear behaviors of compacted graphite iron with different biomimetic units fabricated by laser cladding [J]. Applied Surface Science 2012 , 258(19) : 7699 - 7706.
 - 【47】穆谦. 仿生六边形微凸起结构的摩擦学特性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学 2013.
 - 【48】赵文杰 ,王立平 ,薛群基. 织构化提高表面摩擦学性能的研究进展 [J]. 摩擦学学报 ,2011 31(6) : 622 - 631.
ZHAO W J ,WANG L P ,XUE Q J. Development and research progress of surface texturing on improving tribological performance of surface [J]. Tribology ,2011 31(6) : 622 - 631.
 - 【49】WANG J Q ,WANG X L. State of the art in innovative design of surface texture [J]. Journal of Mechanical Engineering 2015 , 51(23) : 84 - 95.
 - 【50】王晓琳 ,刘克 ,何元安 ,等. 自适应有源吸声控制系统设计 [C]//全国环境声学学术讨论会论文集. 宁波 2007.