

未来美国军用航空油料发展概论

黎文济 张智勇 编著

国防工业出版社



V317
1003

V317
1003-1

号307字登藏(京)

未来美国军用航空油料发展概论

黎文济 张智勇 编著



30713143



国防工业出版社

713143

(京)新登字106号

内 容 简 介

本书对美国军方正在进行的新型航空燃料、航空滑油和航空液压油及其评定方法的研究工作作了系统的介绍,并以美国军方的研究报告作为基本的参考文献,对未来美军选用的航空油料及其评定方法进行了分析和预测。

为了便于读者了解,本书对美国军用航空油料的发展背景,诸如资源状况和合理使用,飞机和发动机的发展,“未来航空油料的生产潜力和有关工艺,以及当前油料使用的重大问题(如喷气燃料的低温性能和润滑性能,直升机传动装置滑油的载荷性能以及液压油的可燃性),等等,也作了简要的介绍。

本书可供从事航空油料生产、科研、管理工作的人员和大院校师生参考。本书对飞机、发动机和直升机设计部门的研究人员以及化工部门的科技人员也有参考价值。

未来美国军用航空油料发展概论

黎文济 张智勇 编著

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

北京市大兴兴达印刷厂印装

*

850×1168毫米 32开本 印张11¹/₈ 287千字

1992年9月第一版 1992年9月第一次印刷 印数: 0001—1500册

ISBN 7-118-00937-7/V·69 定价: 10.30元

前 言

美国军用航空涡轮发动机燃料、航空滑油以及航空液压油是 50 年代开始形成系列的。到了 70 年代,随着飞机和发动机的发展以及问题的积累,航空油料新的发展计划也逐渐形成。本书不是介绍美军航空油料的发展史,而是着眼于其发展动态,预测未来(2000 年前后)可能出现的新情况。

为了向读者提供准确可靠的信息,我们翻阅了近百篇研究报告及有关文献,浏览了数百万字的资料,在书中整理出大量图表(包括 171 幅图和 132 个表),其中浓缩了极其丰富的试验数据和研究成果,有较高的参考价值。

由于条件所限,军用航空润滑脂和各类添加剂的有关资料未能同时与读者见面,更由于水平限制,叙述中错误与疏漏在所难免,请读者见谅。

本书由空军油料研究所组织编写,共分四章:军用航空涡轮发动机燃料、军用航空涡轮发动机/传动装置滑油、军用航空液压油和航空油料测试方法。前三章由黎文济编写,第四章由张智勇编写,插图由李晓康绘制。

缩 写 词 释

1. AA' 原子发射光谱
2. ADM 酸溶解技术
3. AF 原子荧光系统
4. AFAPL 静态结焦仪
5. AFSC 美国空军系统司令部
6. AFWAL 空军赖特航空研究院
7. ALCM 空中发射的巡航导弹
8. AO 抗氧化添加剂
9. ASD 航空系统处
10. ASTM 美国材料试验协会
11. ATF 先进战术战斗机
12. AW 抗磨添加剂
13. BF季戊四醇混合酸基础油
14. BOCLE 球-柱润滑评定机
15. BOT 滑油整体温度
16. BSN 中性二壬基萘磺酸钡
17. CFAE 石墨炉原子发射光谱
18. CFICP 石墨炉电感耦合等离子体发射光谱
19. CI 腐蚀抑制剂
20. COBRA 整体滑油破坏速率分析仪
21. COS 腐蚀-氧化试验
22. CRC 美国联合研究协调委员会
23. CREP 腐蚀评定快速方法
24. CTFE 三氟氯乙烯
25. DCP 直流等离子体发射光谱
26. DERD 英国军用标准
27. DFSC 国防燃料供应中心
28. DHN 萘烷

29. DIOZ 二异辛基癸二酸酯
30. DOC 直接运转费用
31. DOD 国防部 (标准)
32. D_{ws} 磨痕直径
33. EHD 弹性流体动力润滑
34. EPDM 乙烯/丙烯/1,4 己二烯
35. ERBS 放宽规格试验参考燃料
36. FAE 氟化烷基醚
37. FCC 催化裂化
38. FF 润滑油的全配方
39. FIA 荧光指示吸附法
40. FKM 氟烃
41. FS 氟化聚硅氧烷
42. FS 联邦试验方法标准
43. GFP 石墨灯丝直流等离子体发射光谱仪
44. GPGP 大平面汽化装置
45. HCCT 湿箱试验
46. HFPO 六氟环氧丙烷
47. HGMS 梯度磁力分离法
48. HP-DSC 高压差示扫描量热法
49. HP-DTA 高压差热分析法
50. HPLC 高压液相色谱
51. HSCT 高速民用运输计划
52. ICP 电感耦合等离子体
53. ICP AE 电感耦合等离子体原子发射光谱仪
54. ICP MS 电感耦合等离子体质谱仪
55. IHPTET 高性能涡轮增压发动机综合技术
56. IR 红外光谱法
57. JFTOT 喷气燃料热氧化试验
58. JOAP 润滑油联合分析程序
59. LARGE QDM 收集的大小在 1000~1500 μ m 的微粒
60. LCC 寿命周期费用
61. LVDT 线性可变差接变压器

- 62. MCH 甲基环己烷
- 63. MCRT 微碳沉积仪
- 64. MIL 军用 (标准)
- 65. MPC 新戊基醇
- 66. MTI 美国机械技术公司
- 67. NASA 国家航空与航天局
- 68. NIPER 国家石油和能源研究所
- 69. NPI 非极性指数
- 70. N_{PMB} 预混合燃烧器数值
- 71. PADD 美国国防石油管理局
- 72. PE 季戊四醇
- 73. PFAE 全氟烷基醚
- 74. PFPAE 全氟聚烷基醚
- 75. PNF 氟化磷腈
- 76. PWMA 便携式磨损金属检测仪
- 77. QDM 定量碎屑监测器
- 78. QPL 产品合格证
- 79. RCV 还原周期伏安法
- 80. RDE 改进的旋转电极系统
- 81. RUR 润滑油剩余使用寿命
- 82. SIMAAC 同步连续源原子吸收光谱仪
- 83. SOAP 润滑油光谱分析程序
- 84. TDN 磷酸三甲酚酯
- 85. TIB 四异丁烯
- 86. TMD 三羟甲基丙烷
- 87. TOTAL QDM 收集的大小在 $300\sim 500\mu\text{m}$ 的微粒
- 88. WPA 磨损微粒分析仪

目 录

第一章 军用航空涡轮发动机燃料

§ 1 燃料的供应	2
§ 1.1 存在问题	2
§ 1.1.1 美国石油供应入不敷出	2
§ 1.1.2 燃料费用不断上升	2
§ 1.2 对策	4
§ 1.2.1 启用劣质原油与二次加工产品	4
§ 1.2.2 开发化石燃料	6
§ 1.3 放宽燃料规格势在必行	11
§ 1.3.1 扩大油源必然导致燃料价格上升	11
§ 1.3.2 对中间馏分的争夺	12
§ 1.3.3 规格的改变	13
§ 1.3.4 ERBS 燃料的出现	19
§ 1.4 飞机和发动机的改造计划	23
§ 1.4.1 飞机改造计划	24
§ 1.4.1.1 燃料的相容性	24
§ 1.4.1.2 燃料的低温性能	26
§ 1.4.2 发动机改造计划	31
§ 1.4.2.1 燃烧性能与废气排放	31
§ 1.4.2.2 冷起动和高空再点火性能	39
§ 1.4.2.3 腐蚀和热安定性	40
§ 2 空军主燃料从 JP-4 转向 JP-8	43
§ 2.1 节省地面燃料系统的设备投资	44
§ 2.2 大大减少燃料的蒸发损失	46
§ 2.3 节省操作和保养费用	47
§ 2.3.1 节省散装储存罐的保养费用	47
§ 2.3.2 减少燃料操作人力	47

§ 2.3.3 节省飞机保养费用	48
§ 2.4 提高飞机的安全率	51
§ 2.4.1 减少飞机燃料系统的泄漏	51
§ 2.4.2 减少飞机战斗损失	51
§ 2.4.3 减少飞机在平时期的损失	52
§ 2.4.4 减少空勤人员死亡事故	52
§ 2.5 其他方面的节约和效益	53
§ 2.5.1 减少飞机的停飞时间	53
§ 2.5.2 减少购买燃料费用	54
§ 2.5.3 实现战场使用“单一燃料”	54
§ 2.5.4 其他	54
§ 3 空军高密度燃料的开发	56
§ 3.1 近期高密度燃料	58
§ 3.1.1 JP-8X 将来的可得率	58
§ 3.1.1.1 环烷烃原油	64
§ 3.1.1.2 加氢裂化产品	68
§ 3.1.2 价格估算	74
§ 3.2 远期高密度燃料	74
§ 3.2.1 对燃料的冷却要求和冷却模式	76
§ 3.2.2 实际应用的准备	79
§ 3.2.2.1 确定冷却类型	79
§ 3.2.2.2 优选候选燃料	82
§ 3.2.2.3 确定吸热反应的转化率	90
§ 3.2.3 燃料的可得率和价格	94
§ 3.2.3.1 利用美国本土的石油资源	94
§ 3.2.3.2 开发矿物资源	99

第二章 军用航空涡轮发动机/传动装置滑油

§ 1 军用航空涡轮发动机滑油	110
§ 1.1 滑油升温带来的问题	113
§ 1.2 提高滑油的高温性能	114
§ 1.2.1 空军的努力	114
§ 1.2.1.1 MIL-L-27502 滑油的研制	115

§ 1.2.1.2 4 厘斯油的出现	122
§ 1.2.2 海军的目标	133
§ 1.2.2.1 试验室评定	135
§ 1.2.2.2 飞行试验	140
§ 1.3 提高滑油的防腐能力	143
§ 1.3.1 空军的防腐措施	143
§ 1.3.1.1 研制快速评定的方法	144
§ 1.3.1.2 筛选配方	146
§ 1.3.2 海军的滑油防腐措施	155
§ 1.4 酯基滑油与弹性密封件的相容性	156
§ 1.4.1 酯基滑油化学结构对弹性密封体性能的影响	156
§ 1.4.2 酯基滑油与氟碳密封件的相容性	162
§ 1.4.2.1 基础油的影响	162
§ 1.4.2.2 添加剂和滑油配方的影响	164
§ 1.4.2.3 各类氟碳密封件系列产品的相容性比较	170
§ 1.5 军用高温滑油的发展趋势	176
§ 1.5.1 PFAE 的改质工作	178
§ 1.5.2 PFP AE 可溶性润滑添加剂的研制	195
§ 2 军用直升机传动装置滑油	198
§ 2.1 直升机及其传动装置的工作特点	199
§ 2.2 传动系统的损伤形态	201
§ 2.2.1 咬住特性	202
§ 2.2.2 点蚀	202
§ 2.2.3 微点蚀	203
§ 2.2.4 微振磨损	204
§ 2.3 滑油配方对传动装置的影响	204
§ 2.3.1 油膜厚度比 (λ 值)	205
§ 2.3.1.1 粘度	205
§ 2.3.1.2 粘度-压力系数	205
§ 2.3.1.3 添加剂形成的化学膜	207
§ 2.3.2 比热和比重	208
§ 2.3.3 腐蚀问题	209
§ 2.3.4 滑油的潜在效益	210
§ 2.4 传动装置专用滑油的发展计划	218

§ 2.4.1 过渡型滑油的研制	218
§ 2.4.2 优选型滑油的研制	223
§ 2.4.3 先进型滑油的研制	223

第三章 军用航空液压油

§ 1 航空液压油发展简史	228
§ 1.1 水质液压油	228
§ 1.2 防腐液压油	228
§ 1.3 专用液压油	228
§ 1.4 空军多用途的主液压油	229
§ 1.5 非石油基液压油	235
§ 2 液压油从“抗燃”到“不燃”的发展	237
§ 2.1 未来飞机对液压系统的要求	237
§ 2.2 未来飞机对液压油的要求	238
§ 3 空军“不燃”液压油及其专用密封件的研制	239
§ 3.1 “不燃”液压油的研制	240
§ 3.1.1 液体可燃性评定与筛选	240
§ 3.1.2 CTFE 的研制	245
§ 3.2 不燃液压油专用密封件的研制	257
§ 3.2.1 密封件的筛选	258
§ 3.2.2 动态试验	260
§ 4 不燃液压油 CTFE 的效益分析	262
§ 4.1 和平时期的效益和费用	263
§ 4.2 战争时期的效益和费用	265

第四章 航空油料测试方法

§ 1 喷气燃料性能评定方法	268
§ 1.1 喷气燃料润滑性评定方法	268
§ 1.1.1 背景介绍	268
§ 1.1.2 试验设备	269
§ 1.1.3 试验材料考察	271

§ 1.1.4	精确性考察	274
§ 1.1.5	结论	274
§ 1.2	喷气燃料潜在过氧化物含量评定法	275
§ 1.2.1	背景介绍	275
§ 1.2.2	试验过程研究	275
§ 1.2.3	试验结果讨论	276
§ 1.2.4	结论	280
§ 1.3	使用预混合火焰技术评定航空煤油的燃烧性能	280
§ 1.3.1	背景介绍	280
§ 1.3.2	试验仪器	280
§ 1.3.3	试验过程研究	282
§ 1.3.4	结论	284
§ 1.4	定量评定 JFTOT 试管沉积	284
§ 1.4.1	背景介绍	284
§ 1.4.2	碳燃法	285
§ 1.4.3	绝缘法	286
§ 1.4.4	光干涉法	287
§ 1.4.5	结论	288
§ 1.5	红外光谱法测定喷气燃料中烃类组成	288
§ 1.5.1	背景介绍	288
§ 1.5.2	分析仪器及试验程序	289
§ 1.5.3	分析结果与比较	289
§ 1.5.4	结论	291
§ 2	润滑油测试方法	291
§ 2.1	润滑油热氧化安定性	291
§ 2.1.1	背景介绍	291
§ 2.1.2	试验研究	291
§ 2.1.3	结论	294
§ 2.2	润滑油封闭热安定性	294
§ 2.2.1	背景介绍	294
§ 2.2.2	试验研究	294
§ 2.2.3	结论	296

§ 2.3 滑油沉积性能	296
§ 2.3.1 背景介绍	296
§ 2.3.2 试验仪器介绍	297
§ 2.3.3 试验过程考察	298
§ 2.3.4 结论	298
§ 2.4 润滑油起泡性	299
§ 2.4.1 背景介绍	299
§ 2.4.2 试验研究	300
§ 2.4.3 结论	301
§ 2.5 酯基润滑油磨损性能	302
§ 2.5.1 背景介绍	302
§ 2.5.2 试验程序	302
§ 2.5.3 试验参数考察	302
§ 2.5.4 结论	305
§ 2.6 润滑油承载能力	305
§ 2.6.1 背景介绍	305
§ 2.6.2 试验方法及结果	306
§ 2.6.3 结论	310
§ 2.7 润滑油剩余使用寿命评定技术	311
§ 2.7.1 背景介绍	311
§ 2.7.2 几种候选试验方法的比较	311
§ 2.7.3 还原周期伏安法原理	313
§ 2.7.4 还原周期伏安法判断效果	314
§ 2.7.5 结论	316
§ 2.8 高压液相色谱分析润滑油的氧化	316
§ 2.8.1 背景介绍	316
§ 2.8.2 试验仪器和分析方法	317
§ 2.8.3 结论	318
§ 3 发动机滑油系统工况监测技术	318
§ 3.1 改进现用 SOAP 技术	319
§ 3.1.1 背景介绍	319
§ 3.1.2 灰化技术	319

§ 3.1.3 改变电极结构	320
§ 3.1.4 结论	322
§ 3.2 采用新型技术——ICP AE	322
§ 3.2.1 背景介绍	322
§ 3.2.2 仪器介绍	322
§ 3.2.3 光谱分析方法的比较研究	323
§ 3.2.4 结论	326
§ 3.3 磨损微粒分析仪——WPA	326
§ 3.3.1 背景介绍	326
§ 3.3.2 仪器介绍	326
§ 3.3.3 操作参数考察	327
§ 3.3.4 结论	329
§ 3.4 用于现场监测的 SOAP 技术——PWMA	329
§ 3.4.1 背景介绍	329
§ 3.4.2 分析仪器介绍	329
§ 3.4.3 PWMA 的校正研究	331
§ 3.4.4 结论	332
§ 3.5 发动机磨损和润滑剂工况同步在线监测	332
§ 3.5.1 背景介绍	332
§ 3.5.2 监测仪器	332
§ 3.5.3 试验研究过程	333
§ 3.5.4 试验结果	333
§ 3.5.5 结论	334
§ 3.6 润滑系统超精细过滤对工况监测的影响	336
§ 3.6.1 背景介绍	336
§ 3.6.2 试验装置及试验结果	336
§ 3.6.3 结论	337
结束语	341

第一章 军用航空涡轮发动机燃料

从1944年到1976年,美国空军建立和完善了现役飞机涡轮发动机燃料的军用规格系列。1951年首次公布的JP-4规格,是在总结使用JP-1、JP-2和JP-3燃料的基础上建立的。从此,JP-4就成为空军的主燃料。只是由于它的挥发性过高带来的安全问题,特别是侵越战争中飞机低空飞行时被枪击油箱起火造成的巨大伤亡,使空军不得不在1976年公布,JP-8的规格,并计划到1991年用JP-8完全取代JP-4。JP-5是海军舰载飞机的专用燃料。JP-6是热安定性高的涡轮燃料,专用于U-2和TR-1高空侦察机。1970年首先公布的JP-7规格,是专门为SR-71高空高速(巡航速度 $Ma > 3$)侦察机研制的,是一种低挥发性燃料。为了保证发动机的性能,要求燃料有优良的燃烧性能,因此,对JP-7燃料的组成作了严格的限制,规定其主要成分是烷烃和环烷烃,其中芳烃含量不得超过3%,远远低于常规燃料的水平。以上说明,到70年代中期,空军已经有一个能满足各类飞机要求的JP燃料系列。

从表面看,进入80年代以及90年代,也还看不到这个系列有什么重大问题。实际上,从70年代开始,情况就开始有了明显的变化。首先是美国石油资源严重不足,不能不对军用燃料产生巨大影响;高温涡轮发动机的开发是空军研制新一代航空涡轮发动机燃料的基本动力,所以研制与开发化石燃料和高密度燃料的各项庞大计划应运而生;此外,还有对国家放宽规格试验参考燃料的开发,空军也要作大量的配合性研究与试验工作。大量的资料表明,经过长时间的充分准备,大量人力和物力的投入,到本世纪末或下世纪初,美国航空涡轮发动机燃料(简称喷气燃料)将进入新的发展时期。在这个过程中,美国空军将首当其冲,扮演极其重要的角色。

§ 1 燃料的供应

§ 1.1 存在问题

§ 1.1.1 美国石油供应入不敷出

美国人口仅占世界人口 6%，而消耗世界能源高达 35%。它的石油储量虽然也达 265 亿桶，占世界储量的 4.1%，列第 9 位，也不得不每年花大量美元进口石油。例如 1970 年进口 40 亿桶，1973 年 45 亿桶，1976 年 50 亿桶，1979 年 60 亿桶，等等。近几年来，世界石油价格下跌，美国石油公司不愿开掘新油井，1989 年美国石油产量降至 1963 年以来的最低点，进口石油占国内需求量的 46%。美国能源专家和经济学家预言“美国作为石油生产国的顶峰时代已经过去”，“1990 年以后石油产量会急剧下降”，1989 年美国 11 个月外贸赤字高达 1100 亿美元，其中一个重要原因是石油进口增加，仅 11 月份就支出 43.8 亿美元。再加上中东和加拿大石油的进口都不太可靠，美国已充分认识到问题的严重性，决心寻求一切可能的途径，以摆脱对进口的依赖。

§ 1.1.2 燃料费用不断上升

70 年代初，中东曾是廉价石油的来源地，1973~1974 年中东战争，使石油价格开始急剧上升^[1]，见表 1-1。

表 1-1 中东石油价格

	美元/桶
提前价	3.011
1974 年前	11.651
1978 年	12.30
1980 年 9 月	30.0
1980 年 12 月	36~41

石油原油价格的不断提高，必然导致原油炼制平均费用的提高。以美国国内生产的原油为例，1971 年炼制原油的平均费用为 3 美元/桶，1975 年为 8 美元/桶，1979 年近 13 美元/桶。至于进口原油，其炼制平均费用还要高得多。不仅如此，1981 年以前，在美国所炼制的全部原油的 3/4 是属于价格优惠的（部分是国内原油，大部分是进口原油）。到 1981 年 11 月 1 日，根

据美国能源部门的规定，对国产原油的控制价格已失效，以后炼油厂的生产费用便与世界市场上的原油价格同时涨落。

进入 80 年代以来，由于种种原因，石油价格有所下跌。1984 年 5 月，美国能源情报局发表了能源前景报告，指出世界市场石油继续过剩，有可能使石油价格从当时的每桶 29 美元，下降到 1986 年的 26 美元。但以后价格会再次上升，到 1995 年，用今天的美元计算，估计可达 50 美元/桶。

多年来，世界的空运能力（旅客/千里）一直高速增长，50 年代和 60 年代每年平均以 15% 的速度增长，到 1973~1975 年稍慢了些。图 1-1 和图 1-2 分别为预测的世界和美国喷气燃料的消耗趋势^[2]。空运能力猛增，自然意味着对喷气燃料的需求也将大增，这种趋势助长了石油价格的提高，由此航空部门的燃料费用在整个操作费用中的比例，自然也愈来愈大^[3]，见图 1-3，如果说在 1973 年燃料费用只占操作费用的 12%，到 1980 年已超过 30%。1980 年美国民用和军用航空燃料大约消耗 $5.359 \times 10^7 \text{ m}^3$ （155 亿加仑）。如果以每一加仑燃料增加 1 美分计算，共需追加 1.55 亿美元。1979 年，美国喷气燃料缺额 10%，曾迫使航空公司或减少飞行，或以高出平常价格 30 美分/加仑去购买喷气燃料。

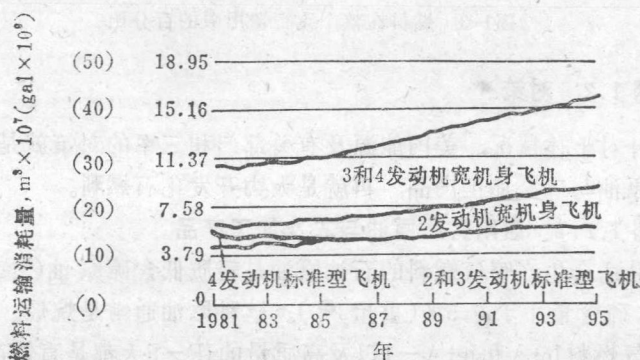


图 1-1 世界航线喷气燃料消耗预测