


航空喷气发动机 燃料的试验

【苏】 B.A. 皮斯库诺夫 著
B.H. 兹列洛夫
常 汝 楫 译



中国人民解放军空军后勤部油料部

航空喷气发动机燃料的试验

〔苏〕 B.A. 皮斯库诺夫 著
B.H. 兹列洛夫 著
常 汝 楫 译



30272349



1980 北京

419926

本书由空军航空油料试验研究所组织翻译，原书为《ИСПЫТАНИЯ
ТОПЛИВ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГА-
ТЕЛЕЙ》，苏联 1974 年版。第四章以后的译文，在翻译过程中曾参考了
石油化工科学研究院的译稿。译文错误和不当之处请提出意见。

418820

目 录

序言	(1)
引言	(4)
第一章 燃料的物理化学指标和使用性能对喷气发动机和飞机性能的影响	(8)
1.1. 同燃料性能有关的发动机和飞机的性能	(8)
1.2. 燃料的性能对飞机和发动机主要性能的影响	(13)
1.3. 喷气发动机燃料现代试验体系的基础	(21)
1.4. 喷气发动机燃料试验方法的分类及对试验方法的要求	(24)
1.5. 喷气发动机燃料的分类	(27)
第二章 喷气发动机燃料的组分和物理化学指标的实验室测定	(30)
2.1. 燃料组分的测定法	(32)
2.2. 燃料烃组分的测定	(34)
2.3. 氧化物和氮化物的测定	(38)
2.4. 硫及其衍生物的测定	(43)
2.5. 固体微粒杂质的测定	(44)
2.6. 气态物质的测定	(53)
2.7. 微生物的测定	(56)
第三章 喷气发动机燃料使用性能的实验室评定	(59)
3.1. 蒸发性的评定	(59)
3.2. 燃料蒸气在空气中爆炸的温度极限	(59)

和浓度极限	(65)
3.3. 燃料带电倾向的评定	(68)
3.4. 燃烧性能的评定	(72)
3.5. 产生积碳性能的测定	(75)
3.6. 抗磨损性能的评定	(78)
3.7. 热氧化安定性的评定	(89)
3.8. 燃料腐蚀性能的评定	(102)
3.9. 低温性能的评定	(107)
第四章 燃料在喷气发动机和飞机的附件及	章一第
(8) 组合件上的试验	(110)
4.1. 飞机油箱试验装置	(112)
4.2. 喷雾试验台	(114)
4.3. 油泵油滤试验台	(118)
4.4. 单管燃烧室试验台	(128)
第五章 燃料的喷气发动机台架试验	(139)
5.1. 燃料台架试验的目的	(139)
5.2. 燃料喷气发动机台架试验的类别	(141)
5.3. 试验台架和设备	(143)
5.4. 燃料台架试验的特点	(158)
5.5. 燃料的可用性按照台架试验结果的评定	(161)
5.6. 对组织燃料台架试验的要求	(164)
第六章 燃料的飞行试验	(165)
6.1. 燃料的飞行试验的目的	(166)
6.2. 燃料的飞行试验的种类	(175)
6.3. 燃料的飞行试验的特点	(176)
6.4. 燃料的质量按照飞行试验结果的评价	(179)
6.5. 对组织飞行试验的要求	(181)
第七章 航空喷气燃料试验体系发展改进的远景	(182)
附录	

1. 燃气涡轮发动机燃料的品种和标准	(192)
2. 燃气涡轮发动机燃料标准试验方法	(194)
3. 喷气式发动机和飞机的燃气道和燃料 系统各零件及组合件用的钢材	(198)
4. 喷气式发动机和飞机的燃料系统各零件及 组合件用的有色金属和合金	(201)
参考文献	(202)

序 言

在整个内燃机发展的过程中，燃料质量的试验和检验问题始终是受到人们的极大关注，这是因为燃料是影响发动机工作的可靠性、耐久性和节油性的重要因素之一。喷气式发动机燃料在这方面也不例外。

不久之前，解决空气喷气式发动机燃料的质量问题和合理的运用问题几乎完全是靠全尺寸发动机的寿命试验。但是随着喷气式发动机寿命的延长和发动机维护使用条件的复杂化，这种燃料质量检验的办法妨碍着新的发动机和飞机的制造及应用。燃料进行试验要花费越来越多的资金，而更主要的是耗费非常多的时间。鉴定一种新油品有时要经过数年之久。此外，由于对一些因素的作用不能完全做到监控和调整，虽然经过喷气发动机的长期台架试验，如果不再次进行试验，有时是多次的反复试验，也还是得不出燃料质量的全面鉴定结论。

科学和技术的现代发展水平完全可以根据燃料使用性能的单项鉴定方法拟订出喷气发动机燃料使用性能的全面鉴定方法，这些单项鉴定方法就是根据在试验室模拟装置上和发动机的各种机件上的试验，以及在真实发动机上的快速试验来评定燃料的一种最重要的使用性能。

每个单项鉴定方法用来解决与燃料某一具体性能有关的一个问题，那么使用这一整套单项鉴定方法就可以在短时间内花费少量的资金和消耗少量的试验油料解决喷气发动机燃料应用当中的一些最重要的问题。

本书的写作目的就是要解决这些问题。书中第一次最全面地

论述了苏联和英美等国家的鉴定方法，以及这些方法的综合配套体系。

俄罗斯苏维埃联邦社会主义共和国
功勋科学技术工作者 技术科学博士

K. K. 巴帕克

（此处为模糊不清的正文内容，疑似为俄文或低分辨率扫描导致的文字失真，无法准确转录）

作 者 的 话

作者衷心感谢B.З.斯库比林, B.Г.斯托利亚罗夫, 俄罗斯联邦功勋科学技术工作者、教授、技术科学博士B.B.洛西科夫及B.M.夏金等人在审阅本书手稿时所提出的一系列宝贵的建议。

作者对为修改本书而提出批评意见和要求将非常感激。

引 言

最初生产的一些航空喷气发动机燃料是用实验室方法进行试验，或是进行发动机台架试验，或是进行飞行试验。在开始阶段，是借用试验柴油、汽车汽油和航空汽油的一些实验室方法，主要是用这些方法来测定燃料的一些物理化学性能，而对于燃料的使用性能，在这个时期，是直接用发动机全寿命台架试验和飞行试验来评定的。

但是，随着喷气航空所担负的任务不断的复杂化，经常需要进行喷气发动机燃料的专门试验。这种情况的产生也是由于下列原因而引起的：1.利用新产区石油进行加工生产；2.需要通过改善燃料的生产过程和使用多效添加剂等办法来制造更高质量的燃料。

使用发动机全寿命台架试验和飞行试验的方法对燃料进行全面的试验，日益成为一个复杂的问题。最初生产的一些喷气发动机的寿命在50~200小时之间，用这种发动机全寿命试验的方法来检验燃料还不会带来困难。

现代发动机的寿命已超过1000小时，用这种发动机全寿命试验的方法，特别是飞行试验的方法来检验燃料的质量，需要花费大量的资金和时间。

做为试验的对象——燃料，人们对它的认识也发生了变化。过去，燃料在试验中只看做是一种液态系统，这个系统中含有各类烃及其各种氧、硫、氮的衍生物。

现今，燃料在试验中被看做是一种四态系统，除液态之外，它还含有固态的微小固体颗粒，气态的溶解空气，生物态的近百种微生物。

因此，从五十年代中期起，特别是出现了超音速喷气飞机之后，开始拟订出大量的实验室评定方法，其中不只是评定燃料的物理化学性能的方法，也包括评定燃料的使用性能的方法。目前在苏联和英美等国家制订的这种实验室方法达40种之多。

苏联的石油部门、航空部门和发动机化学等部门的研究机构在这方面的的工作中是占有主导地位的，苏联部长会议标准委员会油料质量检验国家委员会(ГМК)的工作具有特殊重要的意义。这个委员会负责统一协调国家各部企事业单位的科研机构的力量迅速解决与喷气飞机燃料试验有关的问题。近些年来，基辅民航工程学院(КИИ ГА)对发展民航机用油的试验方法做出了很大的贡献。

苏联制订第一批评定喷气发动机燃料使用性能的方法是同使用TC-1和T-2有关的，这些油是用乌拉尔-伏尔日斯克油区的含硫石油炼制的。这些评定方法中有一种就是检验燃料对铜片的腐蚀作用。

与此同时，Я.Б.切尔特科夫、В.М.夏金和В.Н.兹列洛夫拟订了评定燃料在120~150°C或更高的温度下对BB青铜腐蚀的方法KOC，因为喷气发动机燃料泵的转子是用BB青铜制造的。这个方法已经列入T-4燃料技术条件ТУ426-54中，用于燃料高温腐蚀的定性和定量评定(备用参考指标)。KOC方法属于复试法，因为这种试验方法可以同时评定燃料的热氧化安定性。借助这种方法曾经制配成许多新的苯并噻唑硫醇衍生物做为添加剂，用来降低硫醇含量高的TC-1和T-2的腐蚀性。借助这种试验方法还曾经制配了一些二脂族胺类和甲基丙烯酸酯类聚合物做为添加剂，用来提高燃料在120~250°C下的热氧化安定性。

在这以后，И.В.罗日科夫和Е.С.丘尔舒科夫制订了评定含水燃料对黑色及有色金属腐蚀的方法。现今，燃料的腐蚀性能是按燃料在120°C下，每5小时更换燃料一次，历25小时对BB青铜腐蚀的情况来评定的。

现代喷气发动机燃料的最重要的使用指标是它们的热氧化安定性，该性能最初是用ПК[⊖]方法评定，按燃料在125°C下氧化30~300分钟后吸收氧的数量来评定。以后，А.А.古列耶夫和З.А.萨勃林娜建议使用测定汽油诱导期的试验仪。随后，И.В.罗日科夫、Е.С.丘尔舒科夫和Г.С.希莫纳耶夫又制订了更完善的评定燃料热氧化安定性的氧弹法ЛСАРТ。Е.Р.捷列辛科和М.Е.塔拉雷什金制订了ТСТ-1和ТСТ-2法。И.П.布达罗夫制订了ГОСТ8489-58法。А.Х.阿列克佩罗夫制订了ЛАДУ法，等等。1968年曾将用ТСТ-2试验仪在静态条件下测定燃料热氧化安定性的方法ГОСТ11802-66列入了喷气发动机燃料的综合鉴定试验法。之后不久，又将使用УТС试验仪测定燃料在150~250°C温度下循环通过批产油泵后的所谓动态条件下的热氧化安定性的方法列入了综合鉴定试验方法。现今，喷气发动机燃料的热氧化安定性是使用全苏石油天然气及人造液体燃料炼制科学研究所(ВНИИ НП)研制的试验机测定的，温度条件最高120~135°C，燃料一次通过批产油泵。这个试验方法能最大限度地再现燃料在现代超音速飞机发动机内工作的条件。

ВНИИ НП试验机的主要功用是评定燃料的抗磨损性能。通常，燃料在ВНИИ НП试验机上的试验是在喷气发动机台架试验和飞行试验之前进行。除了ВНИИ НП试验机之外，燃料的抗磨损性能和热氧化安定性还可用А.П.格里亚兹诺夫和В.А.皮斯库诺夫研制的装有批产油泵的ПН-2ТК循环试验机快速测定，试验周期为5小时。使用К.И.克利莫夫、В.А.维林金和Г.И.基奇金研制的КВ-1试验机试验时，所需要的燃料的数量是较少的。此外，还可使用ПФ-1试验仪，这种仪器是П.Г.菲拉托夫研究的。如若分别评定燃料在滚动摩擦和滑动摩擦条件下

⊖ “ПК”法为Я.Б.切尔特科夫、Н.И.马林琴科和В.Н.兹列洛夫于1956年提出，并做为备用参考指标列入Т-4燃料的技术条件中。

的抗磨损性能则可使用由А.Ф.阿克谢诺夫领导所研制的 КИИ ГА-1和КИИ ГА-2磨损机。现今，在英美等国家，喷气燃料的抗磨损性能是使用Ball-Cylinder试验仪评定的。

Б.Д.扎洛加、Е.Р.捷列辛科和Н.Ф.马克西莫夫所研制的喷气发动机小尺寸燃烧室试验机在喷气发动机燃料燃烧性能评定方法的发展中是一个重要的阶段，在这个试验机上可以测定燃料燃烧的完全性能、燃料稳定燃烧的极限和燃料的生碳性能。燃料在小尺寸模拟机上试验的方法，1968年列入了喷气发动机燃料综合鉴定试验法。近来，评定燃料的生碳性使用К.К.巴帕克、В.А.皮斯库诺夫和П.Г.尤列尼亚所研制并推广的 ППЮ试验机。根据 ППЮ法测定燃料积碳值的方法也列入了综合鉴定试验法。当试油的数量不多时，可以用Я.Б.切尔特科夫、И.В.卡列奇茨和В.Н.兹列洛夫所研制的试验仪，或用由Я.М.帕乌什金领导所研制的试验仪测定燃料的生碳性能。使用小尺寸的燃烧室评定燃料的燃烧性能在英美等国家也是很普遍的。

1962年，为了测定燃料的生碳性，在国家喷气燃料标准ГОСТ10227-62中增加了“无烟火焰高度”的指标，该指标是用灯蕊灯测定的。

六十年代初，在美国和英国曾对燃料在喷气发动机内燃烧时的热辐射给予了极大注意，这个指标是在试验室内专门仪器上测定，并用辉光值来表示。1960年，在美国，该方法列入了ASTM D1740-60T。苏联在1968年曾将辉光值的测定列入了喷气发动机燃料综合鉴定试验法。

综合鉴定试验法中还包括一些测定燃料组分的新方法：

1. 根据钠试验测定环烷酸皂的方法。
2. 燃料同水相互作用(乳化性，界面分离状态)的测定法。
3. 萘含量的光谱测定法。
4. 元素硫、硫化氢、硫醇硫含量的电位测定法(ГОСТ17323-71)。

喷气燃料长时间的多阶段的试验方法大大地阻碍着新油品的使用。但是制定科学的综合鉴定试验法就可以在短时间内相当可靠地和客观地评定出喷气发动机燃料的使用性能，而无需进行台架试验和飞行试验。

第一章 燃料的物理化学指标和使用性能对喷气发动机和飞机性能的影响

燃料的性能对喷气飞机的一些极为重要的性能，以及对飞机的若干个个别机件和组件是有重要影响的。

现今，燃料在飞行器上不仅做为热能能源使用，而且还将它做为工作载体使用，例如在动力机件和液压调节器内，载体要起功能传递的作用，此外，在热交换器内还要做冷却剂使用，等等。这就对喷气发动机燃料的物理化学指标和使用性能提出了各方面的要求，燃料不符合这些要求就会恶化飞机或发动机的飞行技术使用性能^[42]。

1.1. 同燃料性能有关的发动机和飞机的性能

发动机和飞机的各式各样的众多性能中，最主要的是：飞行技术性能和工作的可靠性。

飞行技术性能 飞机的主要技术性能中，如爬升率、航程、续航时间、最大速度和飞行的高空性能，它们不只是与飞行器的空气动力性能有关，而且也与发动机的推力-经济性能参数有关。例如如图 1，燃料小时消耗下降 25 公斤/小时，就会使最大速度降低约 1.5~2%^[49]。

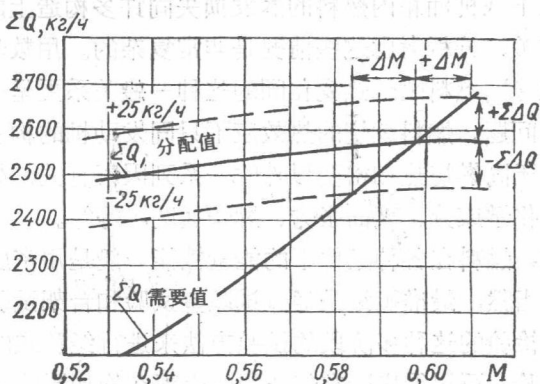


图1 飞机(四个燃气涡轮发动机)水平飞行的最大速度同燃料消耗的关系
 $\Sigma\Delta Q = \pm 25$ 公斤/小时——燃料消耗公差

现今已经确认, 装有燃气涡轮发动机的飞机, 使用兼有高密度和高燃烧热指标的燃料时, 其飞行技术性能最好。当其它条件相同时, 燃料的燃烧热越高, 单位燃料消耗率就越低, 飞机的飞行航程或续航时间就越大。

在指出飞机和发动机的主要飞行技术性能同燃料的质量间的这些大家所共知的规律的同时, 还需要从现实情况出发对这些规律作一些补充, 以便更为全面地反映出燃料的作用。

试验证明, 炼制既有大密度, 又有高燃烧热的喷气发动机用的石油烃类燃料是做不到的, 而通常炼得的燃料却是热能高而密度低的燃料(这种燃料由轻质馏分组成), 或是密度较大而燃烧热又过低的燃料(较重的馏分组成)。在使用过程中, 燃料的这些指标对飞机飞行航程和续航时间的影响, 在计算各种相应的修正值时必须给予充分而正确的考虑。

确定高空飞行时燃料的蒸发损失对飞机飞行技术性能的影响, 以及确定用释热系数表示的燃料在发动机燃烧室内释热的实际影响程度是较为复杂的。

低压下飞机油箱内燃料的蒸发损失同许多构造上的因素及飞行条件有关，分析考虑这些情况是非常复杂的。用数学式表述飞行技术性能同燃料燃烧热变化间的这种一般关系更是一个复杂的分析计算问题。燃料燃烧的热效应不非同发动机的构造参数有关，而且还同燃烧热和密度以外的一系列因素有关，如燃料的馏分组成、化学成分、表面张力、燃烧速度，等等。

因此，燃料在各种条件下的能量性能一般是用密度和燃烧热测定的，当然，最准确地是通过试验室试验和台架试验，并最后在飞行中检验的这种多阶段的试验方法来进行经验式的评定，经过这些试验，可以得出所有起作用的因素在施加影响后的综合评定结果。

可靠性 所谓可靠性就是生产出来的产品在要求的时间间隔内和既定的工作量范围内，在保持自己使用指标的情况下完成一定功的一种性能。对于任何一种产品，这种性能是取决于它的各组成部分（零件、部件、组件）的安全性、良好性和耐久性^[66]。

保持飞机所应有的各种参数和发挥飞机所具有的功能，是同飞机动力装置的良好工作大有关系的。对做为飞机重要组成部分的动力装置发动机的基本要求是，在既定的寿命期间，发动机应保证具有各种相应的耗油率和必备的推力。发动机的这些极为重要的性能是同发动机各种机件和组件的准确工作有关，当这些部件工作参数的标准或它们之间的功能协调稍有变动，发动机各种性能的数据就会剧烈地变化。例如：计算表明，而且各型发动机的实际试验也证明，当燃气涡轮发动机转子的转数下降1%，则发动机的推力也相应地平均下降3~7%^[53]。随飞行高度的增加，这种影响也就加大。

涡轮及其尾喷管导向器的工作效能和技术状态对发动机的推力-经济性能具有明显的影响。例如：涡轮的效率下降1%，发动机的经济性便下降2%；尾喷管导向器截面面积超过标准1%，就会使推力下降1.3%，耗油率增大1.1%。发动机经济性能的恶化

同样还会由于发动机燃烧室和排气系统内全压损毫的增大而引起(表1)。

燃气涡轮发动机的主要推力-经济性能的变化

同其主要机件工作效能之间的关系。

表1

发动机的主要性能	试验计量的准确度, %	发动机主要性能的变化, %				
		转子转数下降1%	效率下降1%		面积增大1%	
			压气机	涡轮	尾喷管	导向器
耗油率(增大)	±1	—	0.6~1.3	0.8~1.8	0.5~1	0.8~1.3
推力(下降)	±0.5	3~7	0.6~1.3	0.8~1.8	达1.2	0.8~1.3

燃气涡轮发动机对其一些机件和组件主要参数变化的高度敏感性和各参数对诸如耗油率、推力影响的情况是经过实践检验过的。例如,通过对某些燃气涡轮发动机长期台架试验结果的分析证明,当发动机寿命用尽时,压气机的效率下降1.5%,燃烧室内总压恢复系数下降1%,因此,由于压气机及涡轮的工作系数的下降和在长时间的试验中发动机的气体通道变形,涡轮前燃气温度要超过允许标准若干倍,推力也低于规定的标准(图2、3)。这时如若使发动机各种需要参数值恢复到原来的标准值,那就需要在10~15额定工作小时后,多次调整发动机的油泵调节器和清洗发动机的压气机。

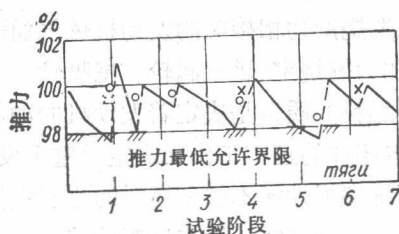


图2 燃气涡轮发动机在长期台架试验过程中推力的变化

△——调整转数 ○——清洗压气机 ×——尾喷管性能发生变化