



中国喷气燃料

刘济瀛等 编著

中国石化出版社

TE626
009

054275

中国喷气燃料

刘济瀛等 编著

林 风 审订



200426388

中国石化出版社

(京)新登字048号

内 容 提 要

本书是我国第一部喷气燃料方面的技术专著。书中叙述了我国30多年来喷气燃料及其添加剂的研究、生产和使用概况，重点介绍其生产工艺、物理-化学性质、使用性能、技术发展途径和质量评定；书中汇集了大量的我国喷气燃料的实测数据，并给出了有关的性质计算公式。本书的鲜明特点是密切结合中国实际，回答和解决喷气燃料研制和使用中的各种问题，并从喷气燃料应用学的角度剖析喷气燃料对喷气飞机-发动机的性能发挥及使用可靠性的影响。

本书可供从事喷气燃料的科研、生产、使用及喷气飞机-发动机工程技术人员阅读，也可供有关高、中等院校师生参考。

中国喷气燃料

刘济瀛等 编著

林 风 审订

中国石化出版社出版

(北京朝阳区太阳宫路甲1号 邮政编码:100029)

海丰印刷厂排版

海丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本 14¹/₄印张 2插页 317千字 印1—1500

1991年11月北京第1版 1991年11月北京第1次印刷

ISBN 7-80043-162-2/TE·019 定价:7.10元

序

我国的喷气燃料是在我国炼油工业的基础上发展起来的，并紧随我国航空事业的发展而进展。它在迈出发展第一步的时候，首先遇到了我国原油低硫含量带来的问题，即低硫喷气燃料对镍铬合金产生的高温烧蚀问题。这个问题别的国家当时没有遇到过，对我国构成了喷气燃料发展道路上的暂时困难。克服这个困难却有效地帮助我国燃料供应有关各方成长了一步。三十多年来，我国从事喷气燃料发展的工作者陆续遇到过许多问题，也就在一个一个地解决问题的过程中，一步一步地前进和成长。时到今天，我国生产的喷气燃料已能满足航空部门提出的各种要求，并为世界各国航空界所乐意采用。这主要是在我国社会主义制度下有关各方协同努力取得的成果。

解决我国喷气燃料发展中所遇到的问题，有很多具体的技术经验，把这些经验总结起来对后来的工作者是有价值的。

本书各位作者都是二、三十年来亲身参加过全部或大部分问题的解决过程的，他们总结自身经历的经验比局外人有更结合实际、体会更深之便。

航空工业关系经济发展、技术进步、国防力量等的进步，西方各国和苏联对喷气燃料的科研开发极为重视，做了很多工作，著述很多。我国发展喷气燃料也已三十多年，做了很多品种开发、生产、性能评定、应用等的研究和产品评价、鉴定工作，而到现在尚没有比较全面的专著，足证在我国喷气

燃料及其应用的重要性尚未受到应有的重视。本书着重从应用学观点，结合经验总结，对喷气燃料各有关问题比较全面地加以论述，使之成为富有实用价值的专著。这是我国这方面的第一个尝试。当然本书论述并非一切完善。

喷气燃料发展到今天，许多问题已经得到解决，但并非所有问题都已经解决，而且新喷气燃料的出现会带来新的问题，阅读本书可以引起专业读者感到继续努力的责任。

我得机会先读本书，愿为之序。

林 风

一九八九年四月

前 言

1956年，我国首次用玉门原油试生产了喷气燃料。用这种燃料在发动机台架长期试车中，发现了镍铬合金火焰筒严重烧蚀，以后在飞行试验中。又出现了飞机-发动机在高空飞行时“喘震”现象。从此我国开始喷气燃料的生产和使用性能的研究，迄今已有30余年。在这几十年中解决了各种各样的问题，把我国喷气燃料质量提高到国际通用水平，也奠定了我国喷气燃料应用学研究的基础。

我国所处的地理气候条件、飞机-发动机的结构材料 and 设计制造工艺、以及原油性质和炼油工艺，都有自己的特点。因此，在喷气燃料的生产和使用过程中发生的问题和出现的现象，与国外所遇到的不尽相同，对其解决途径和认识也就不尽相同。在有些方面，如镍铬合金火焰筒的燃烧腐蚀机理及其抑制，高压柱塞燃油泵的磨损原因，大庆航空煤油变色原因及其热氧化安定性较差的原因，以及原油中加入缓蚀剂对喷气燃料的水分离特性的影响等，我国进行的研究都有独到之处。

30多年来，对我国喷气燃料的物理-化学性质及使用性能评定进行的大量研究，积累了许多数据。它们是有关的科研设计部门和使用单位必需的重要基础资料和参考资料，迫切需要汇总和条理化以方便查找。

近些年来国内陆续出版的一些油料应用方面的教材和手册，都有有关喷气燃料的章节，但数据都不够完整，论述也

不甚全面。我国至今还没有喷气燃料的专著。在国外,特别是苏联虽然出版了一些有关喷气燃料的专著,但又不可能完全适用于我国的具体情况。有鉴于此,将我国喷气燃料多年来的研究成果、生产和使用经验加以概括和系统化,提供较全面的参考资料,帮助读者了解我国喷气燃料在其发展过程中所发生的问题及其解决方法,无疑是有益的和必需的。这也是本书的宗旨。

本书是对我国喷气燃料研究成果、生产和使用经验的总结,对国内外专著中已有详尽叙述的喷气燃料的一般知识,尽可能不予重复。对国外在某一专题方面的最新进展,将在有关章节中加以扼要介绍。本书的重点是在叙述问题和解决办法过程中,介绍我国在发展喷气燃料中的技术和学术上的成就。也正因为如此,本书在内容上不求全面,论述结论也难免有局限性,但不失为喷气燃料应用学研究中的一个有益的补充。

在我国喷气燃料的研究、试产和使用试验过程中,石油化工科学研究院、航空材料研究所、空军油料研究所、兰州化学物理所、各有关炼油厂、航空发动机制造厂及空军的一些修理厂,都曾投入较大力量参与工作,许多同志尽了很大努力。书中引用的工作成果是各单位作出的贡献,也是有关同志当之无愧的功绩。在本书出版之际,谨对这些单位和同志表示感谢,并愿以此书做为纪念。我们在编著本书时,努力保持所引用资料的原意,但不可避免地加上编著者的综合分析意见,特此声明。

此外,本书经特别允许多处引用石油化工科学研究院未发表的试验结果,特此申明,并表感谢。本书还对引用的国外有关文献作者致谢。

本书前言及第一章由刘济瀛、郑志新编写，第二、三、五、七章由刘济瀛编写，第四章由冉国朋编写，第六章由冉国朋、周路庚、郑志新、程瑾、王翠芳、宋广成和刘济瀛分节集体编写。全书由刘济瀛负责主编。

本书承石油化工科学研究院林风副院长仔细审阅，提出许多宝贵意见并亲笔修改，使本书臻于完善，并为本书作序。对此，我们深表感谢。

由于编著者水平有限，错误之处欢迎读者批评指正。

作者

目 录

第一章 喷气燃料应用学.....	1
一、喷气燃料质量的含义.....	1
二、喷气燃料的质量的优化.....	3
三、喷气燃料质量的鉴定.....	4
四、我国喷气燃料质量鉴定程序.....	11
五、喷气燃料应用学.....	14
参考文献.....	16
第二章 喷气燃料性质对飞机-发动机工作性能的影响.....	17
一、航空涡轮发动机的零部件的设计结构特点.....	18
二、航空涡轮发动机和喷气飞机的使用特点.....	31
三、喷气燃料性质对飞机-发动机工作性能的影响.....	34
四、正确使用喷气燃料的重要意义.....	44
参考文献.....	47
第三章 国外喷气燃料使用问题及产品标准的发展.....	48
一 国外喷气燃料使用问题.....	48
二、喷气燃料产品标准的发展.....	61
参考文献.....	67
第四章 我国喷气燃料的生产工艺及质量概况.....	68
一、原油的性质.....	68
二、喷气燃料的生产工艺.....	73

三、喷气燃料的品种及质量	94
参考文献	114
第五章 我国喷气燃料的物理-化学性质及使用性能	115
一、物理-化学组成——馏分组成，元素组成，非烃化合物和机械杂质	116
二、一般物理-化学性质——分子量，密度及膨胀-压缩特性，液态时的粘度和表面张力，水和气体在燃料中的溶解度，声学性质，电性质，蒸汽压及燃料蒸汽的某些性质	138
三、热物理-化学性质——燃烧热，热效率，汽化潜热，热容，焓，导热系数及冷源	193
四、可燃性质——闪点，着火温度极限，着火浓度极限，自燃点和点火能	228
五、燃烧性能——燃烧完全性，贫油熄火边界，空中点，生炭性和排气冒烟	239
参考文献	255
第六章 我国喷气燃料质量的发展	257
一、镍铬合金火焰筒的烧蚀	257
二、发动机燃气系统部件上的附灰	270
三、空中“喘震”现象	275
四、结晶点和冰点指标	284
五、涡喷-五发动机启动点火器电极间生炭联桥	296
六、热氧化安定性	312
七、润滑性和抗磨性	334

八、洁净性.....	349
九、颜色安定性.....	364
十、与材料的相容性.....	371
十一、起电与静电.....	384
十二、贮存安定性.....	405
十三、添加剂的应用.....	412
参考文献.....	428
第七章 我国喷气燃料发展展望.....	431

第一章 喷气燃料应用学

油品应用学，其中包括喷气燃料应用学，是本世纪50年代以来在苏联形成的一个完整的新兴学科，其首创人为К.К.巴帕克(К.К.Папок)教授。60年代初，К.К.巴帕克教授和В.В.尼基金(В.В.Никитин)工程师将这一学科称之为Хи-Мотология，系三个俄文词的缩写组合：Химия(化学)+Мотор(发动机)+Логика(逻辑学)。国内近些年来有将其直译成“发动机化学”而出现在书刊上。实际上，Химотология是用来代替油品应用一词，以表示油品应用已经发展成一门新兴的科学学科，我们认为，直译为“发动机化学”含义不清楚。译成“油品在发动机中应用时的物理-化学行为”又太冗长，而且，油品并不限于在发动机中使用。因此，本书保留油品应用这一习惯用语，并为了表示其学科性质，加上一个“学”字而成为油品应用学。

油品应用学中，对喷气燃料的质量、使用性能及其合理利用进行研究的科学，称之为喷气燃料应用学。要了解这一学科，首先必须对喷气燃料质量、使用性能和合理利用这三者之间的关系作一介绍。

一、喷气燃料质量的含义

喷气燃料在燃气涡轮发动机中，不仅提供热能，而且还有其它一些重要功能，如：用做压气机和尾喷管的某些部件的工作液体，在燃油-润滑油换热器中用做润滑油冷却剂，在

供油部件中用做润滑介质等。因此，燃料质量直接关系到发动机工作的安全可靠、寿命和经济性。此外，燃料在加入飞机油箱之前的地面贮运保管，对其随后在发动机中的使用，也有直接影响，如燃料的洁净性。在当前环境保护受到日益重视的情况下，燃料本身及其燃烧产物对环境污染及生态平衡的危害，也成为保证燃料质量的重要因素。

产品质量，从经济学角度，可解释为产品的使用价值，亦即产品能够满足用户需要所应具备的特性。使用目的是产品质量最基本的性能要求，但是，同时还必须要求使用寿命长、安全可靠和经济性好。喷气燃料的质量，也必须符合这个共同的要求，因而也就同“应用”、“管理”等概念紧密联系，同发动机工作的可靠性紧密联系。燃料质量系通过其使用性能表现出来，亦即燃料质量为其各种性能的总和，其中每个性能都要能够在规定的使用条件下，保证发动机在寿命期内圆满完成规定的功能。而且，燃料在规定的贮存期内，其质量指标的变化应该不超出规定的范围。

发动机的可靠使用，系指发动机在各种规定的工作状态、使用条件和技术维护等条件下，保持其规定的功能参数值不发生超出允许的变化范围。因此，燃料质量和发动机可靠使用这两个概念，有不可分割的直接联系。

表示燃料质量的各种性能的总和中，最重要的是在喷气发动机和飞机工作过程中，同燃料及其燃烧产物直接接触的系统和零部件的工作性能。燃料保证它们可靠工作的性能，称之为燃料的使用性能，它们只能在使用过程中才能表现出来。

喷气燃料的使用性能质量水平，取决于飞机-发动机的设计和结构特点及使用条件。例如，某些喷气燃料对镍铬合

金火焰筒引起坑点状燃烧腐蚀（简称为烧蚀），对有耐热涂层的镍铬合金火焰筒和铁基材料火焰筒则不会引起烧蚀。在前一种情况，质量不符合要求的燃料不能保证火焰筒为镍铬合金的发动机安全可靠工作，而在后一种情况，同样燃料的质量是合格的。又如喷气燃料的低温使用性能指标之一的冰点，由于气候条件、飞行速度和续航时间等的不同，可以订为 -40 、 -47 、 -50 和 -55°C 。研究燃料质量与航空技术装备安全可靠工作之间的关系，是确定燃料质量的最重要依据。

二、喷气燃料质量的优化

喷气燃料的质量，首先要保证飞机-发动机安全可靠工作，因此，质量指标的确定常常留有一定的质量富余度——在苏联又称为质量保险数（国内有译成质量备数），它是燃料整体或其个别使用性能的实际值与允许值之间的差数。质量指标留有余地是必要的，但是，过大的保险数，对提高飞机-发动机的可靠性就不再有决定性意义，反而会限制喷气燃料的来源和提高燃料的生产成本，亦即影响燃料的可用性和经济性。特别是在喷气燃料消耗量日益增大，石油资源日益减少和性质日益变劣的情况下，这个问题更显得日益突出，甚至不得不改进飞机-发动机的设计或材质来适应燃料质量指标的某些变动。例如，喷气燃料的冰点，并不是愈低愈合理。因为，原油常压蒸馏生产喷气燃料的收率，每降低 1°C 冰点，减少约 0.3% （重）（对原油）。又例如喷气燃料中的芳烃含量，每放宽 1% （体），可使生产喷气燃料的原油来源增加约 30% 。对大型民用飞机而言，由于芳烃含量增加而增加了所载燃料的体积能含量，还可节约操作费用。由此可见，燃料质量的合理保险数，对燃料的可用性和经济性有很大的意义。改进

飞机-发动机燃油系统的设计有时也能发挥作用,例如,为了降低对燃料冰点的要求,在飞机的燃油系统中燃料冷却最厉害的燃油过滤器部位进行加温;为了降低对燃料的热氧化安定性的要求,对靠近发动机热源的输油圈加以隔热等。燃料质量优化,就是在燃料质量与飞机-发动机的工作可靠性和经济性、以及燃料本身的可用性和经济性之间,求得最优的统一。由于飞机和发动机的不断改进,炼油工艺的不断进步,原油储量及性质的变化,燃料质量优化将不断进行。研究喷气燃料质量优化是合理利用喷气燃料资源的重要内容。

三、喷气燃料质量鉴定

优化喷气燃料质量,使燃料在保证飞机发动机系统安全可靠工作和燃料本身资源的合理使用之间保持平衡和统一,有赖于研究燃料使用性能的定量水平和评定方法,建立科学的质量鉴定体系。燃料的一般物理-化学性质指标,只能间接或不很精确地表示燃料在发动机中的行为,不能代替使用性能的评定。

喷气燃料使用性能的评定,在喷气燃料发展初期,常常是根据其在真实发动机台架试验和飞机飞行试验甚至长时间试用中所得数据和经验教训进行的。这种检验燃料质量的鉴定方法,既昂贵,又耗时。随着经验的积累和认识的深化,逐渐有了改进,如尽量减少发动机台架试验,并与发动机检验试验合并进行。随着航空事业的发展,这种质量鉴定方法已逐渐被抛弃而为新的鉴定程序所代替。原因是多方面的,

(1) 当燃料用真实发动机进行试验时,有多种因素同时起作用,而这些因素不易控制和调节,以致难以判断和辨别燃料在保障发动机工作可靠性上所产生的作用和作用的程

度。例如，发动机的起动可靠性，既与燃料质量有关，又与起动点火器的结构、组装质量和试验操作有关。点火电嘴电极间如果生炭联桥形成短路，则起动点火肯定失败，生炭联桥通常与燃料生成积炭倾向性（如芳烃含量高、粘度大等）有关。但是，用同一个燃料，在有些起动点火器上，电极间很容易生炭联桥，在另一些点火器上又很难产生或者不发生这种电极间生炭联桥的现象，因而很难凭一次甚至少数几次发动机台架试验结果下结论。

(2) 由于飞机和发动机的型号繁多，性能和用途千差万别，选择有代表性的发动机进行燃料质量的全面鉴定试验是非常困难的。选择一种发动机进行长期台架试验，虽然考验了燃料的长期作用因素，但只对该类型发动机有代表性，推广到其它类型发动机则常常有很大的局限性，甚至出现完全不同的结果。例如，硫含量很低的燃料，用燃烧室火焰筒为镍铬合金的发动机试验时，火焰筒壁会出现严重烧蚀；用燃烧室火焰筒为铁基材料的发动机试验时，则无此种现象。这就是前一节所述的燃料的使用性能和质量是通过飞机和发动机的设计结构特点和使用条件表现出来的缘故。一个燃料采用多种发动机进行短期台架试验，则与时间因素有关的燃料质量又考验不出来，如燃料与发动机燃油系统材料的相容性就是长期作用过程的例子。

(3) 现代航空燃气涡轮发动机的寿命，长达数千甚至上万小时，要按照发动机寿命试验来鉴定燃料质量，实际上是不可能的。不仅耗费太大，而且试验周期太长，以致增加了影响试验结果的因素。因此，甚至发动机生产部门都尽可能进行等效试验以缩短试验时间。等效试验可以保证发动机的强度可靠性，但不能用来检验燃料质量，因为燃料对发动

机工作可靠性的影响中，包括燃料及其燃烧产物与发动机有关部件接触时间的因素和燃料用量的因素，这些因素的影响是无法在短时间等效试验中鉴定出来的。

(4) 由于生产喷气燃料的原油性质不断变化，炼油工艺不断进步，加入喷气燃料的添加剂品种逐渐增多和更新换代，以及航空发动机和飞机的日新月异，采取发动机台架试验来鉴定燃料质量的办法，即使采用短时间的等效试验，也难以跟上技术进步的步伐，因而必然要求喷气燃料质量鉴定体系随着技术进步而改进。

(5) 加深燃料性质对飞机-发动机工作可靠性的影响的认识才是规范燃料质量的科学依据，这种认识来源于喷气燃料应用基础研究。进行这样的基础研究不可能依靠发动机台架试验。

因此，开发新的、科学的喷气燃料质量鉴定体系，来取代基于发动机台架试验和飞机飞行试验的燃料质量鉴定体系，已是形势发展的迫切需要。60年代初，一种现代化的喷气燃料质量鉴定体系，开始发展和形成。其基本原理是通过模拟燃料在发动机相应部件的各个单一工作过程，对燃料进行性能评定，然后综合各单个使用性能而对燃料质量作出综合性的全面评价。在苏联，这种方法称之为喷气燃料质量综合鉴定法。不过，在西方国家，则采用完善燃料产品标准及分析方法作为鉴定燃料质量的重要手段。我国也是从60年代中期开始探索，到80年代中期也已基本形成了喷气燃料质量综合鉴定程序。

喷气燃料质量综合鉴定法的基础是成龙配套有科学依据的质量鉴定方法，能直接或间接准确地再现燃料在飞机和发动机中的行为，并尽可能进行定量评价。