

30295604

喷气燃料性能手册

(苏) H.Φ.杜博夫金 Ю.П.马苏尔
B.Γ.马拉尼切娃 E.П.费奥多罗夫

著



航空工业出版社

30295606

V31-62
01

喷气燃料性能手册

HK19109

Н. Ф. 杜博夫金
[苏] В. Г. 马拉尼切娃 著
Ю. П. 马苏尔
Е. П. 费奥多罗夫
常汝楫 译

航空工业出版社

1990

内 容 简 介

本手册由六章组成。第一章讲述喷气燃料的物理化学组成；第二章讲述物理性能；第三章研究燃料的热工性能；第四章研究燃烧过程的特点；第五章讲述使用性能；第六章谈对燃料质量的要求、检验和使用程序。全面而详尽地阐述了喷气燃料的各种性能和质量检验方法。

本手册不仅包括了喷气燃料性能的实验资料和计算数据，而且还包括了若干同燃料化学组成、温度及压力等因素有关的极为重要的燃料性能变化规律。资料充实，数据可靠、便于查找。

本手册对于合理应用喷气燃料，改进燃料质量，保证航空发动机工作的可靠性及飞行安全，促使商品佳化以及开发新产品等方面均有很重要的作用。

本手册适于航空科研部门、喷气燃料应用研究部门以及用油单位的科研人员和工程技术人员使用及学习。

本手册由空军油料研究所根据《Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив》1985年版组织翻译。

喷气燃料性能手册

[苏] Н. Ф. 杜博夫金 Ю. П. 马苏尔 著
В. Г. 马拉尼切娃 Е. П. 费奥多罗夫
常汝楫 译

航空工业出版社出版发行

(北京市和平里小关东里14号)

—— 邮政编码 100029 ——

全国各地新华书店经售

一二〇一工厂印刷

1990年4月第1版

1990年4月第1次印刷

850×1168毫米1/32

印张：9

印数：1—3000

字数：242千字

ISBN 7-80046-253-6/V·052

定价：7.15元

前 言

航空技术的发展方向是提高飞行器的飞行速度和高度，改善飞行器动力装置的经济性、重量性能、可靠性和寿命，所有这些向喷气燃料和航空技术装备的质量提出了更高的要求。当前，绝大多数安装燃气涡轮发动机的航空技术装备：飞机和直升机是用喷气燃料工作的。喷气燃料根据其牌号的不同是在 $60\sim 320^{\circ}\text{C}$ 范围内馏出的石油蒸馏馏分。燃料在航空技术装备内使用的特点是对其工作的安全性有较高的要求。这点首先决定了对喷气燃料质量的要求以及对其性能必须有个全面的了解。

近些年来，出现了新的生产原料资源和石油加工工艺方法。这就引起了航空技术装备使用的标准燃料的理化性质和使用性能的变化。到目前为止，已经积累了许多关于它们性能（例如抗磨损性能、电性能、燃烧性能、热安定性能等）方面的实验资料及计算数据，同样还取得了许多有关这些性能因受各种因素的影响而发生变化的新资料。

此外，当前并没有一本有关现代喷气燃料的系统化的手册。在若干讲述油料和动力装置的书籍中也提出了一些燃料的理化性质资料，但通常只是做一般的说明。因此，公布资料往往互有矛盾。这种情况和事实决定了必须出版一种手册，它包括航空技术装备设计人员和使用单位人员所必需的有关现代喷气燃料质量的资料信息。

在手册内不仅有系统化的关于喷气燃料性能的实验资料和计算数据，而且对若干同燃料化学组成、温度、压力及其它因素有关的极为重要的性能变化基本规律的分析给予了极大的关注。对

此，作者尽力考虑工程实践中所遇到的一些具体的问题。

手册由六章组成。在第一章内讲述喷气燃料理化组成的概况，在第二章内讲述一般的物理性能，在第三章内研究燃料的热工性能，在第四章内研究燃烧过程特点，在第五章内讲述使用性能，在第六章内谈对燃料质量的要求、检验和使用程序。资料的这种划分在很大程度上是带有条件性的，也是为了叙述和使用方便。

在选择计算公式时偏重从过程和性能的物理概念出发。当做不到这一点时，作者则选用最简单的公式，公式中的经验系数多数是经过了作者的验证，采用的值也是通过了计算值同实验数据的校正。

对于选用图解资料，我们给予了特别的注意。这是因为许多资料还不能够以定量分析的形式来表示。此外，在选用特性值时，用图解表示可以避免粗略的错误，这不管是在有实验资料时，还是特别在没有实验资料时。

在文献中经常找不到关于所用各种计算公式的误差和使用范围。为了避免这种缺陷，一般，在手册内也给出计算值同实验值的图解比较。因此，根据必要的计算准确度，可以确定哪些公式在哪些参数变化的范围内可以利用。

作者对于技术科学博士恩格林（Б. А. Энглин）教授为本手册最后审核校订所给予的极大的创造性帮助表示衷心的感谢；对于化学科学副博士柯瓦廖夫（Г. И. Ковалев）和主设计师普斯蒂列夫（О. Т. Пустырев）在审阅手稿中所提出的一系列宝贵的意见表示谢忱，以及对于格茨维切（А. А. Гецевич）、穆德列佐沃伊（Т. К. Мудрецово́й）和库巴霍沃伊（Т. Н. Кубахово́й）在手稿付印准备工作中所给予的帮助表示感谢。我们将对为本手册提出的任何批评意见和要求的读者表示谢意。

代 表 符 号

Д	——燃烧发烟性, %
Д.И.	——柴油指数
Л.Ч.	——辉光值
a	——声速, m/s
C	——物质的含量(浓度), % (体)
C_B	——火焰传播上限燃料的含量(浓度), % (体)
C_H	——火焰传播下限燃料的含量(浓度), % (体)
c_p	——真等压比热容, kJ/(kg·K)
c_v	——真等容比热容, kJ/(kg·K)
D	——蒸气(气体)向空气扩散的系数, m ² /s
d	——磨损斑痕直径, mm
E	——活化能, kJ/kmol; 表面辐射密度, kW/m ²
G	——消耗, kg/h (kg/s)
g	——重量份数; 重量磨损
g_c	——积炭重量, g
$g_{H_2O}^*$	——给定条件下水的最大溶解度, % (重)
g_{H_2O}	——非溶解性沉淀物的重量, mg/100ml 燃料
H	——焓, J/kg (kJ/kg); 飞行高度, m
$H_{исп}$	——蒸发热, J/kg
H_H	——可燃混合气的热值, J/kg
ΔH_v	——冷潜能, J/kg (kJ/kg)
I	——燃料指数, m ³ /kg
$h_{н.л}$	——无烟火焰高度, mm
ΔH	——焓的增量, kJ/kg
k	——绝热指数
K_n	——抗磨损性能综合指标
L_M	——摩尔化学计算余气系数, 摩尔氧化剂/摩尔燃料
L_0	——化学计算系数, 公斤氧化剂/公斤燃料
M	——分子量
m	——烃分子内的氢原子数(在燃料的置换公式内)
n	——烃分子内的碳原子数(在燃料的置换公式内)
n_D	——折射系数
P	——压力, Pa (MPa)
P_i	——组分 <i>i</i> 的局部压力, Pa
$P_{кр}$	——临界压力, Pa (MPa)

P_M ——摩尔极化强度, kg/kmol
 $P_{np} = P/P_{kp}$ ——置换压力
 Q ——电荷 (量), C (仑); 发火 (电) 能量, mJ
 Q_B ——燃料 (烃) 的高燃烧热, kJ/kg
 Q_H ——燃料 (烃) 的低燃烧热, kJ/kg
 Q_V ——体积燃烧热 (能容量), kJ/L
 q ——电荷密度, $\mu\text{C/m}^3$
 R ——通用气体常数, $\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$
 Re ——雷诺数
 R_0 ——比气体常数, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 r_i ——组分 i 的摩尔 (体积) 份数
 T ——温度, K
 T_{kp} ——临界温度, K
 $T_{np} = T/T_{kp}$ ——置换温度
 t ——温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_{an} ——苯胺点, $^{\circ}\text{C}$
 t_{ben} ——闪点, $^{\circ}\text{C}$
 t_w ——发热度, $^{\circ}\text{C}$
 t_K ——计量温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_{CB} ——自燃温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_{CM} ——混合气温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_s ——大气压力下的平均重量沸腾温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_T ——燃烧产物的理论温度, $^{\circ}\text{C}$
 $\text{tg}\delta$ ——介电损耗角正切
 U_H ——火焰传播的正常速度, m/s
 U^*_H ——火焰传播的最大正常速度, m/s
 V ——体积, m^3 ; 体积消耗, m^3/s
 V_{kp} ——临界体积, m^3
 w ——流速, m/s
 z_H ——压缩因数
 z_{kp} ——临界压缩因数
 α ——余气 (氧化剂) 系数
 α_i ——等容膨胀系数, K^{-1}
 β ——密度的平均温度修正数, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
 β_p ——等温压缩系数, Pa^{-1}
 γ ——等容压力系数, K^{-1}
 Δ ——柱塞 (球) 球面磨损, mm
 δ ——电极间的距离, mm
 ε ——相对介电常数
 ε_n ——火焰黑度

- ε_0 ——真空绝对介电常数, $C \cdot N^{-1} \cdot m^2$
 η_T ——燃烧完全系数
 θ ——置换温度, 等于 $\frac{T_{KP} - T}{T_{KP} - 273}$
 κ ——电导, S (PS); 电导率, S/m (PS/m)
 λ ——导热系数, W/(m · K)
 μ ——动力粘度系数, Pa · s
 ν ——运动粘度系数, m^2/s
 ρ ——密度, kg/m^3
 ρ_{KP} ——物质临界状态的密度, kg/m^3
 $\rho_{np} = \rho/\rho_{KP}$ ——置换密度
 σ ——表面张力, N/m
 τ ——时间, s、min、h
 τ_{CB} ——自燃迟滞期, s
 Φ_H ——积炭因数, %
 ψ ——空气相对湿度
 ψ_{O_2} ——氧化剂内氧的浓度, % (体)
 ω ——重质因数

目 录

前言

代表符号

第一章 物理化学组成(1)

- 1.1 馏分组成(1)
- 1.2 元素组成和族烃组成(3)
- 1.3 杂原子化合物(6)
- 1.4 机械杂质(16)
- 1.5 溶解水和游离水(18)
- 1.6 溶解气体(24)
- 1.7 燃料内的微生物及其生命活动产物(30)

第二章 物理性能(32)

- 2.1 密度和热系数(32)
- 2.2 饱和蒸气压(52)
- 2.3 粘度(56)
- 2.4 热导率(64)
- 2.5 扩散系数(71)
- 2.6 表面张力(75)
- 2.7 传声性能(79)
- 2.8 电性能(84)

第三章 热工性能 (106)

- 3.1 燃烧热和能容量 (106)
 - * 3.2 热值 (111)
 - 3.3 蒸发热 (111)
 - 3.4 热容 (115)
 - 3.5 绝热指数和气体常数 (132)
 - 3.6 焓 (133)
 - 3.7 冷潜能 (134)
-

第四章 燃烧过程特性 (138)

- 4.1 化学计算系数 (138)
 - 4.2 燃烧产物的组成 (139)
 - 4.3 燃烧产物的温度 (147)
 - 4.4 火焰传播的正常速度 (159)
 - 4.5 火焰传播的浓度极限 (162)
 - 4.6 发火 (点火) 能量 (166)
 - 4.7 形成可燃混合气的温度极限 (168)
 - 4.8 自燃温度和自燃迟滞期 (172)
 - 4.9 排烟和辐射 (178)
 - 4.10 积炭 (187)
-

第五章 使用性能 (197)

- 5.1 热氧化安定性 (197)
- 5.2 抗磨损性能 (207)
- 5.3 同结构材料、橡胶技术制品和密封胶的
相容性 (219)

5.4	燃烧产物的腐蚀性	(224)
5.5	喷气燃料的毒性及处理喷气燃料 的规则	(230)

第六章 对燃料的要求和对油料质量的 的检验以及允许燃料使用的 程序

(232)

6.1	苏联国产喷气燃料的性能及国家 标准 (ГОСТ) 规定的质量指标	(232)
6.2	国外喷气燃料的性能及规格规定 的质量指标	(234)
6.3	燃料的添加剂	(243)
6.4	喷气燃料的综合鉴定试验方法	(249)
6.5	燃料的质量检验、贮存和在航空 技术装备上应用的程序	(258)
6.6	苏联喷气燃料与国外喷气燃料的 互换代用	(261)

附录

(263)

1.	标准大气 (ГОСТ 4401-81)	(263)
2.	喷气燃料等压膨胀系数 α_t 同温度的 关系	(266)
3.	国外喷气燃料的密度 ρ 、运动粘度 ν 、等压膨胀系数 α_t 同温度的关系	(266)
4.	苏联气候区的特征 (ГОСТ 16350-70)	(267)
5.	国际单位制 (SI) 的物理量及其与	

其它单位的关系	(268)
6. 压力单位间的相互关系	(269)
7. 某些物理常数	(269)

参考文献

第一章

物理化学组成

1.1 馏分组成

馏分组成表示燃料内含有的在一定温度范围内馏出的各种馏分的量。含有量以百分率（%）（体）表示，并按照ГОСТ217782方法进行测定。

按照诸如初沸点和10%（体）的馏出温度等馏分组成指标可以评定燃料的蒸发性和与其有关的火灾危险性、启动性，以及在燃油系统产生气阻的倾向和在油泵内产生空穴的现象。上述温度越低，燃油系统工作受到破坏的危险性就越高，燃料的蒸发损失就越大。

根据50%（体）的馏出温度可以评定燃料中间馏分的挥发性，同蒸馏曲线其它温度点配合在一起可以表示品种相同但批次不同的燃料的成分的稳定性。

90和98%（体）的馏出温度表示燃料内高分子烃的含量。这些温度越高，则越难于使燃料具有高的燃烧完全性、不产生排烟和在燃烧室不形成积炭。

现代喷气燃料馏分组成曲线同标准指标值的比较见图1.1。燃料蒸馏时的液相温度大大地高于气相温度，它们之间的差取决于气液相所占体积之比。各种燃料的气、液相比值列于表1.1。当燃料上方空间的压力下降时，燃料馏分的馏出温度便下降（图1.2），因此，燃料的蒸发性便加强。

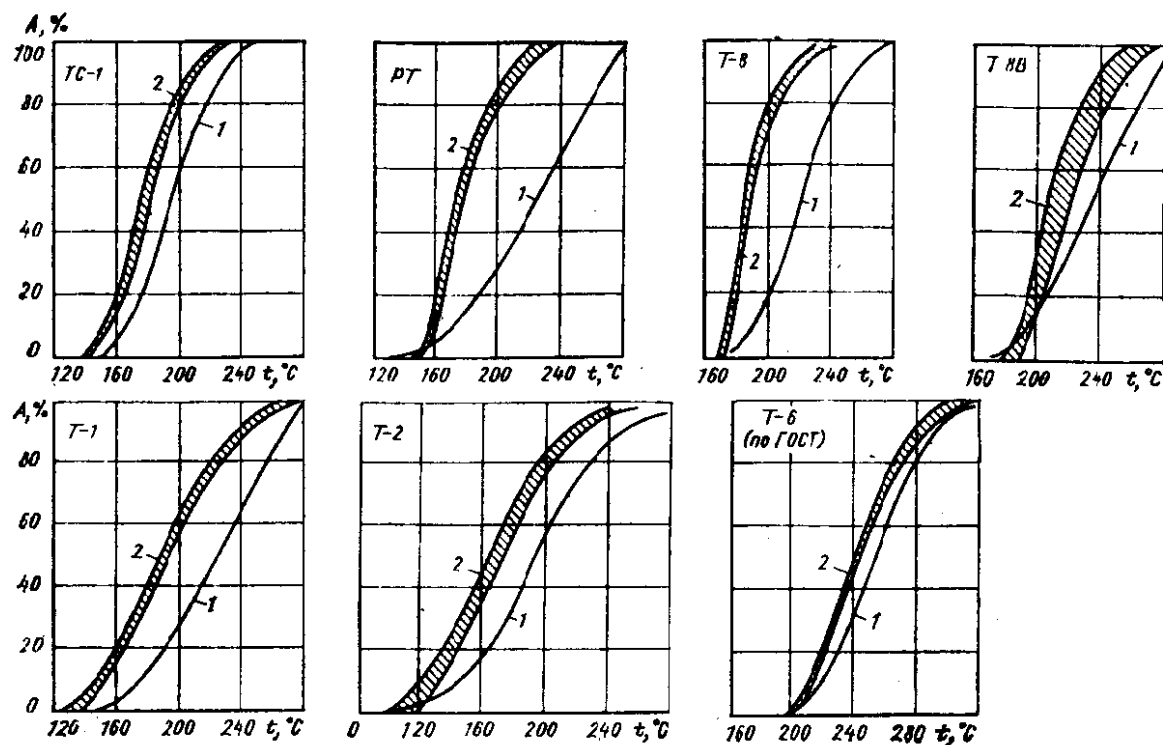


图 1.1 燃料的馏分组成

1—ГОСТ的标准曲线；2—商品油样品（馏出范围）； $A = V_t / V_0$ ，式中 V_t ——到达温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 时，燃料蒸发的体积， V_0 ——燃料原有的体积（等于 100cm^3 ）

燃料蒸馏时的气、液相温度

〔塔拉雷什庚（М.Е.Тарарышкин.）的数据〕

表1.1

相 态	在不同 V_n / V_{*} 比时的温度， $^{\circ}\text{C}$					
	≈ 0	0.10	0.40	0.50	0.90	0.98
T 1燃料						
液 气	173	181	210	222	271	310
	130	160	192	205	259	284
TC-1燃料						
液 气	156	164	184	190	229	274
	127	147	172	179	219	250
T-3燃料						
液 气	120	148	181	190	232	280
	64	116	168	180	225	245

* V_{*} 和 V_n ——气、液相体积。

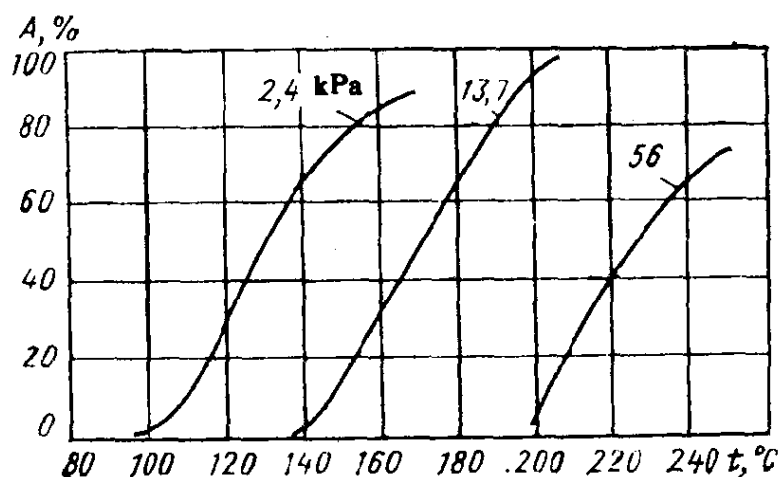


图 1.2 $V_n, V_{\Sigma} = 1.8$ 和压力不同时, T-6 燃料的馏分组成
(塔拉雷什庚的数据)

$A = V_t / V_0$, 式中 V_t ——到达温度 t (°C) 时, 燃料蒸发的体积, V_0 ——燃料原来的体积 (等于 100 cm^3); V_n ——气相体积; V_{Σ} ——液相体积

1.2 元素组成和族烃组成

喷气燃料本身98% (体) 以上是由烷烃、环烷烃和芳香烃组成。因此, 燃料的主要化学元素是碳和氢。

燃料的烃组分同所加工的原油的性质和加工工艺中所使用的石油化工加工方法有关。有关喷气燃料烃组分的综括数据^[1~5]和苏联航空发动机研究院 (ЦИАМ) 多年来的统计数据列于表 1.2。

喷气燃料内的烷烃中多为异构烷烃, 具有低的熔点。喷气燃料内芳香烃的含量是受到限制的, 因为它们产生积炭和发烟的倾向高。TC-1 商品燃料内 (根据 ГОСТ 10227-62) 芳香烃的含量不允许超过 22% (重)。在其它品种的苏联喷气燃料内, 芳香烃的含量不得超过以下数量: T-6——10% (重), PT——22% (重), T-1——20% (重)。芳香烃中对生炭和发烟影响最大的是双环

烃，因此，它们在燃料内的含量限制在 2 ~ 3 % 以下（重）。

喷气燃料的族烃组成和元素组成 表1.2

燃 料	族烃组成,% (重)				元素组成,% (重)	
	烷 烃	烯 烃	环烷烃	芳香烃	C	H
T 1	24 ~ 42	1.0 ~ 1.3	42 ~ 69	14 ~ 20	86.2 ~ 86.5	13.5 ~ 13.7
TC 1	42 ~ 52	1.1 ~ 2.0	30 ~ 49	11 ~ 21	85.7 ~ 85.8	14.0 ~ 14.1
PT	53 ~ 58	0.2 ~ 0.3	25 ~ 30	12 ~ 22	85.8 ~ 86.1	13.9 ~ 14.2
T-8	21 ~ 50	—	26 ~ 45	14 ~ 18	85.8 ~ 86.0	13.9 ~ 14.1
T 6	12 ~ 20	—	75 ~ 80	3 ~ 6	86.4 ~ 86.6	13.4 ~ 13.6
T 2	40 ~ 43	1.3 ~ 1.5	42 ~ 50	14 ~ 16	85.5 ~ 85.7	14.3 ~ 14.5

环烷烃在密度上比芳香烃的密度小，居烷烃和芳香烃的中间位置。若干喷气燃料样品的烷烃、芳香烃和环烷烃的含量见表 1.3^[5, 3, 20]。

喷气燃料的烃组分(%重) 表1.3

烃	TC 1	PT			T-8	T-8B (试验)	T-6	
		№1	№2	№3			№1	№2
烷 烃	50	58.4	58.3	57.8	50.4	29.9	17.0	15.1
脂环烃 (环烷烃)	32.9	25.4	24.4	25.7	33.6	60.8	77.4	80.6
其 中								
单 环	36.4	35.0	34.1	34.8	19.6	41.6	22.3	31.1
双 环	4.2	1.5	2.2	2.0	6.7	17.0	41.3	39.8
三 环	1.1	0.8	0.9	0.9	4.3	2.2	11.8	7.8

续表

烃	IC 1	PT			T 8	T 8B (试验)	T 6	
		№ 1	№ 2	№ 3			№ 1	№ 2
芳香烃	17.1	16.2	17.3	16.5	16.0	9.3	5.6	4.3
其 中								
烷基苯	13.6	12.0	12.6	13.0	12.7	6.2	2.8	5.7
环烷苯	1.9	1.0	1.1	1.0	3.0	2.1	4.5	2.1
二环烷苯	1.2	0.6	0.8	0.8	—	0.9	0.2	0.6
烷基萘	0.8	0.1	0.2	0.2	0.3	0.1	0	0
燃料的密度 (20 C) kg m ⁻³	778	781	778	780	785	805	843	840

喷气燃料内芳香烃的总含量可以按照已知的密度值和苯胺点进行计算⁶⁾：

$$C = 692.4 + 0.0122\rho t_{an} - 0.8\rho_{20} - 10.4t_{an} \tag{1.1}$$

式中C ——芳香烃的含量，%（重）；

ρ_{20} ——燃料在20 C时的密度，kg/m³；

t_{an} ——苯胺点，C。

按照公式 (1.1)计算出的值同实验数据的均方根误差不超过0.1~3.6% [当 $\rho_{20} = 774 \sim 822 \text{ kg/m}^3$ ， $t_{an} = 55 \sim 68 \text{ C}$ ，芳香烃的含量在9~21%（重）范围内]。

航空燃料的元素组成变化在以下范围内：C = 85.5~86.6%（重），H = 13.4~14.5%（重）。从石蜡基原油炼制的喷气燃料内，氢的百分率大。芳香烃含量高的燃料内，氢的百分率低。

但是在热工计算中采用的燃料的条件组分，其元素组分则为：C = 85和H = 15%（重）。

燃料元素组成按照下列公式计算，其误差可不超过2%：