

发动机化学丛书

燃料喷射与燃料发动机化学

(苏) A. A. 布拉特柯夫主编

30926303

中国石化出版社

30926302

511
02

发动机化学丛书

火箭燃料和喷气燃料 发动机化学

〔苏〕A.A.布拉特柯夫 主编

常汝樵 译 刘济瀛 校

hK3/04

中国石化出版社

(京)新登字048号

内 容 提 要

本书为苏联发动机化学丛书之一。内容包括：液体火箭发动机和空气喷气发动机构造和工作的基本原理；火箭燃料和喷气燃料的分类及品种，它们的理化性质和使用性能以及生产、运输和合理应用。同时也介绍了管理这些燃料的安全技术规则和喷气燃料的综合试验方法。

本书的读者对象为火箭燃料和喷气燃料的科研、生产及应用人员，同时也可作为工科院校的教师、研究生及学生的参考用书。

А.А. Братков Е.П. Сергеев

А.Ф. Горенков А.М. Чирков

А.А. Ильинский В.Н. Зрлов

Химмотология ракетных и реактивных топлив

Издательство «Химия» 1987

火箭燃料和喷气燃料发动机化学

〔苏〕А.А.布拉特柯夫 主编

常汝楫 译 刘济源 校

(北京朝阳区太阳宫路甲1号 邮政编码：100029)

中国石化出版社出版

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 11¹/₂印张 248千字 印1—1500

1992年5月北京第1版 1992年5月北京第1次印刷

ISBN 7-80043-180-0/TE·028 定价：5.40元

引 言

20世纪后半叶的标志是喷气技术（航空、火箭、宇航）即利用喷气发动机来实现反推作用原理的技术的蓬勃发展。通常，喷气发动机分为两类：一类是用液体或固体燃料工作的火箭发动机，另一类是空气喷气发动机：燃气涡轮发动机、涡轮螺旋桨发动机、冲压式发动机和脉动式发动机。在第一类发动机内，氧化剂和燃烧剂位于火箭本身内部，因此，它们没有空气也能工作，例如在宇宙空间。第二类发动机只能在空气介质中工作，因为在这些发动机内是使用空气中的氧作为燃烧剂的氧化剂。

使用火箭发动机可以解决飞行器高速（包括达到第一和第二宇宙速度）运动的问题，可以在陆地飞行很大的距离，如洲际弹道火箭，也可以在太空飞达月球、金星和太阳系其它星体，如在近地轨道上飞行的航天器。

在航空中利用空气喷气发动机才有可能克服速度的音障、增大飞机的飞行高度和航程。现今，速度已达到 $2\sim 4M$ ，即超过音速 $1\sim 3$ 倍，并正在制造飞行速度更大的超音速飞行器。航空技术正逐渐地与太空技术接合在一起，多次作用型载人宇宙飞船本身具有飞机的许多品质，而装有空气喷气发动机的无人驾驶飞行器又称为有翼火箭。装空气喷气发动机的飞机构成了现代航空的基础，它排挤了使用性能很差的装活塞发动机的飞机。

特别是在近30~40年间,火箭技术得到了蓬勃的发展,研制出了数量众多的不同用途和结构的火箭,从较小的反坦克火箭弹到巨大的洲际弹道火箭,以及可以将数吨重的航天器及乘坐3~7人的多次作用型飞船送入近地轨道的运载火箭。在这些火箭和航天器内都安装了液体或固体燃料火箭发动机,它们能发出数克(航天器的微型校正发动机)到数百吨(运载火箭发动机)的推力。

在喷气技术的创始和发展中,苏联起到了主导的作用。理应被称做俄国航空之父的伟大俄国学者Н.Е.茹科夫斯基(Н.Е.Жуковский)远在1882~1886年间首次在世界上提出了反作用运动的理论基础。杰出的俄国发明家、学者、现代宇宙航行的奠基人К.Э.齐奥尔科夫斯基(К.Э.Циолковский)在喷气技术特别是在火箭技术发展中的贡献是不可估量的。他提出了星际和宇宙飞行的科学理论,指出实现这种飞行的唯一工具是安装液体火箭发动机的多级火箭^[1]。他还研究了液体火箭发动机的作用原理和工作结构图,建立了火箭燃料组分向燃烧室泵送和利用一种燃料组分外部冷却发动机壁的理论基础。他推导出计算火箭在主动段末端最大运动速度的公式。

齐奥尔科夫斯基是首次建议采用液氢、烃、液氧和氮氧化物作为液体火箭燃料组分的诸人中的一个。这种火箭氧化剂和燃烧剂至今仍用于运载火箭的液体火箭发动机,实现了齐奥尔科夫斯基的关于宇宙飞行的遗愿。他曾研究了各种化学元素燃烧反应的热效应,并提出了对液体火箭燃料的基本要求^[1]。

齐奥尔科夫斯基的追随者Ю.В.孔德拉秋克、(Ю.В.Кондратюк)、Ф.А.灿德尔(Ф.А.Цандер)、В.П.韦钦金

(В. П. Ветчинкин)、М. К. 吉洪拉沃夫(М. К. Тихонравов)、С. П. 科罗廖夫(С. П. Королев)、В. П. 格卢什科(В. П. Глушко)、А. М. 伊萨耶夫(А. М. Исаев)、Ю. А. 波别多诺斯采夫(Ю. А. Победоносцев)、Н. Г. 切尔内绍夫(Н. Г. Чернышев)和其它火箭技术的献身者进一步地发展了和通过实验实现了他的基本思想^[2]。他们之中的许多人不仅在制造和发展液体火箭发动机上而且在选择和应用火箭燃料组分的理论方面做出了关键性的贡献。例如，孔德拉秋克曾建议利用硼和锂的氢化物作为火箭燃烧剂。他认为液态臭氧、液氧是有前景的有效火箭氧化剂，而石油产品、液氢、液态甲烷和乙炔以及某些金属：铝、镁、硅、硼、锂是有前景的有效火箭燃烧剂^[2,6]。灿德尔是第一次制造和试验用汽油和液氢工作的液体火箭发动机诸人中之一。他卓有成效地研究了合理地选择火箭燃料组分和在其组成内使用金属的问题。在发动机内消耗完燃料后再燃烧火箭某些金属部件这一思想同样是他提出的^[2]。

切尔内绍夫完成了大量的关于液体火箭燃料的性质和其在发动机内燃烧过程的研究工作^[3]。格卢什科院士在发展苏联液体火箭发动机及其燃料的工作中做出了很大的贡献。他总是对于正确地选择液体火箭发动机的能源给予特别的关注。远在1930年他就建议利用硝酸、四氧化二氮、四硝基甲烷、过氧化氢和氯酸作为氧化剂^[2]。当时，格卢什科还建议采用含有铍的胶体燃烧剂。他是利用可以取得单位推力达500s的三元火箭燃料诸如 O_2-H_2-Be 和 F_2-H_2-Li 想法的提出人，并同时研究和实际应用了液体火箭发动机化学点火的原理^[1,4]。

在国外的研究者中，在发展火箭技术特别是在其萌发阶

段，贡献最大的首推G.奥伯特、V.布劳恩（德国）、E.森格尔（奥地利）、R.埃诺-佩利特里（法国）、R.戈达德（美国）等人〔2、5〕。

在空气喷气发动机制造和发展中，苏联的科学和实践也总是处于世界的领先地位。远在1887年，工程师П.Д.库兹明（П.Д.Кузьмин）第一个制成了燃用煤油的燃气涡轮发动机，至今这种燃料仍然是航空上的主要燃料（自然这要考虑到在过去的年代中，在燃料的组成和制取工艺上发生的变化）。在1906年~1908年间，工程师科罗沃金（Коровогин）曾制成用汽油工作的脉动式空气喷气发动机〔6〕。

除了茹科夫斯基的基础工作之外，С.А.普雷金（С.А.Чаплыгин）、Б.С.斯捷奇金（Б.С.Стечкин）的理论研究以及天才的苏维埃设计家А.Н.图波列夫、В.В.伊柳辛、О.К.安东诺夫、А.С.雅科夫列夫、М.Л.米尔、Н.Д.库兹涅佐夫、А.М.柳利卡等人的实验和试验设计工作在发展空气喷气发动机中也有重要贡献。苏联的空气喷气发动机飞机和直升机创造了许多飞行速度、航程和高度的世界纪录。在喷气燃料的研制和其在航空技术装备上的合理应用方面，苏联学者们所完成的许多工作对于发展空气喷气发动机具有很大的意义。

喷气技术的创建和发展已成为现代科学技术进步的重要组成部分，它对于各国的社会和经济的发展施加了并将继续施加巨大的影响。每年有亿万的人在利用民航的服务，航空运输每年要运送亿万吨的货物，送入相应轨道的通信卫星可保证大距离地实际上可向地球任何一点传送电视节目，宇宙研究开阔了科学知识及其实际应用的新视野。与此同时，喷气技术也变成了残酷的战争武器，它同核武器和其它大规模

杀伤武器结合在一起给全人类带来毁灭性的危险。

现代喷气技术装备是非常复杂和价格昂贵的，因此，对它们最重要的要求是它们在使用中要有高度的可靠性和耐久性。火箭燃料和喷气燃料的效率、质量及其使用性能在这里起有很大的作用。因此，上述燃料的发动机化学问题具有非常重要的科学意义和实际意义。

目 录

引言

第一篇 液体火箭燃料	1
第 1 章 安装液体火箭发动机的发动机装置的构造 和工作	1
1.1 安装液体火箭发动机的发动机装置的基本 构造原理	1
1.2 液体火箭发动机内产生的各种过程的特点	7
第 2 章 燃料的分类和对燃料提出的要求	19
2.1 液体火箭燃料的分类	19
2.2 对液体火箭燃料提出的要求	22
第 3 章 氧化剂的组成、理化性质和使用性能	46
3.1 含氧氧化剂的组成和性质	46
3.1.1 液氧	46
3.1.2 臭氧	52
3.1.3 过氧化氢	54
3.2 含氮氧化剂的组成和性质	62
3.2.1 硝酸氧化剂	62
3.2.2 四氧化二氮	71
3.2.3 四硝基甲烷	79
3.3 含氟氧化剂和含氯氧化剂的组成和性质	80
3.3.1 液氟和二氟化一氧	80
3.3.2 卤素的氟化物	84

3.3.3	氮的氟化物	87
3.3.4	氟酸和氟的氧化物	88
第4章 燃烧剂和单元燃料的组成、物理化学性质及使用性能90		
4.1	氢燃烧剂的组成和性质	90
4.1.1	液氢	90
4.1.2	冰晶态氢、胶态氢和固态氢	94
4.2	烃类燃烧剂的组成和性质	95
4.3	胺燃烧剂的组成和性质.....	106
4.4	肼燃烧剂的组成和性质.....	109
4.5	单元(单组分)燃料的组成、物理化学性质和使用性能.....	117
第5章 燃料的储存、运输、倒注和中和处理129		
5.1	氧化剂的储存、运输、倒注和中和处理.....	129
5.2	燃烧剂的储存、运输、倒注和中和处理.....	143
第二篇 喷气燃料161		
第6章 空气喷气发动机的构造和燃料在发动机内使用的特点161		
6.1	空气喷气发动机的构造和使用的范围.....	162
6.2	飞机燃料系统的构造和燃料在系统内使用的条件.....	170
6.3	对燃料质量的要求.....	183
第7章 喷气燃料的生产187		
7.1	利用石油直馏方法制取燃料.....	187
7.2	通过破坏加工过程制取燃料和利用添加剂改善燃料的质量.....	196
第8章 苏联喷气燃料的品种和质量200		

8.1	喷气燃料的品种·····	201
8.2	燃料的质量·····	202
第9章	燃料的使用性能·····	211
9.1	泵送性·····	211
9.2	蒸发性·····	227
9.3	发火性·····	231
9.4	燃烧性·····	234
9.5	沉积物生成的倾向·····	245
9.6	同结构材料的相容性·····	258
9.7	抗磨性能·····	267
9.8	冷却性能·····	272
9.9	毒性·····	274
第10章	国外的喷气燃料·····	276
10.1	国外燃料的国际标号和牌号·····	276
10.2	规格对燃料质量的要求·····	278
10.3	国外燃料的实际质量及其同苏联燃料的互 换代用·····	289
第11章	喷气燃料的鉴定试验·····	295
11.1	综合鉴定试验方法·····	295
11.2	非标准化的鉴定试验方法·····	297
11.3	鉴定试验方法指标的标准和燃料的实际 质量·····	315
第12章	喷气燃料的储存、运输、质量、检验和节 油途径·····	321
12.1	燃料的储存和运输·····	321
12.2	燃料质量的检验和燃料管理的安全技术·····	328
12.3	节约喷气燃料的途径·····	332

结语	339
参考文献	346

第一篇 液体火箭燃料

第1章 安装液体火箭发动机的 发动机装置的构造和工作

液体火箭燃料的发动机化学是研究与火箭发动机装置的结构有密切关系的液体火箭燃料合理应用的问题。液体火箭发动机的结构和工作特点以及整个火箭的燃料系统向火箭燃料组分的理化性质和使用性能提出一定的要求。因此，在本章内将叙述一些与安装液体火箭发动机的发动机装置的构造和工作特点有关的基本概念。

1.1 安装液体火箭发动机的发动机装置 的基本构造原理

液体火箭发动机 依靠飞行器（火箭、飞机、宇宙飞船）机舱内液体火箭燃料（氧化剂和燃烧剂）燃烧产物的燃气气流从发动机喷管喷出而产生推力的这种喷气发动机称作液体火箭发动机。液态氧化剂和燃烧剂借助某种方法（通常使用泵）在高压下从飞行器贮箱送入液体火箭发动机的燃烧室，在燃烧室内由于燃料混合气的强烈燃烧生成高温（3000～5000K）的气态产物^[4]。因为燃烧室内的压力达到几十和几百个MPa，燃烧室与喷口切面（大气压或真空）的压力差很大，这些产物便在喷管管道内膨胀，并高速流出。

安装液体火箭发动机的发动机装置的最简单的结构图见图1-1〔2〕。无疑，这种结构图只能看出发动机装置的主要部件：

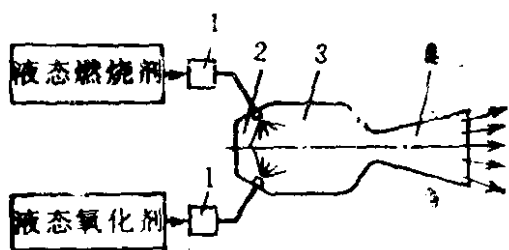


图 1-1 安装液体火箭发动机的发动机装置示意图

- 1—燃烧剂和氧化剂供给系统；
2—头部；3—燃烧室；4—喷管

实际上这些装置是十分复杂的。根据火箭燃料组分供给系统的不同：泵或气瓶，上述装置的结构图也不相同(图1-2和图1-3)〔6〕。在安装长时间作用型液体火箭发动机的大型火箭的发动机装置内，通常使用氧化剂和燃烧剂的泵供给系统，

件：氧化剂和燃烧剂贮箱、燃料供给系统和发动机燃烧室。实际上这些装置是十分复杂的。根据火箭燃料组分供给系统的不同：泵或气瓶，上述装置的结构图也不相同(图1-2和图1-3)〔6〕。在安装长时间作用型液体火箭发动机的大型火箭

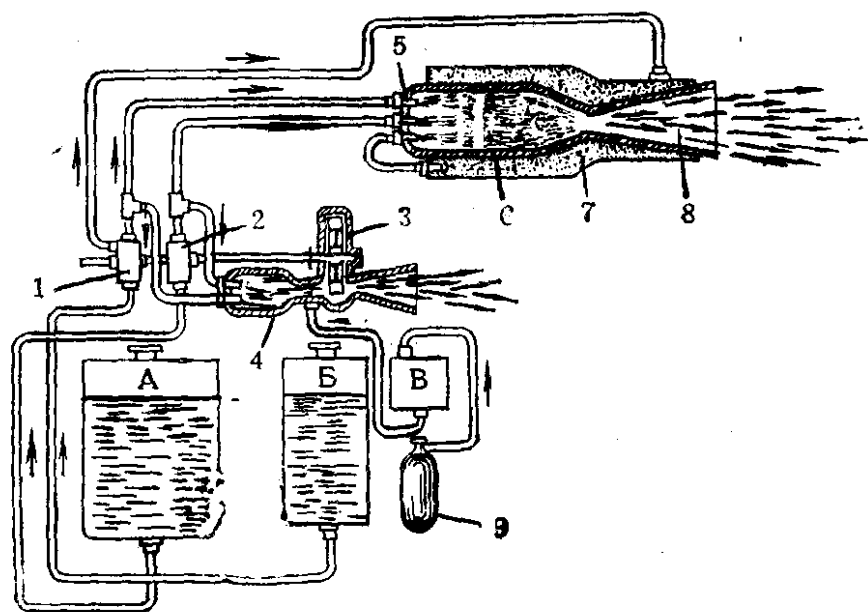


图 1-2 安装涡轮泵燃料供给系统的液体火箭发动机示意图

- 1, 2—氧化剂和燃烧剂供给泵；3—蒸气涡轮；4—制取蒸气的辅助发动机的燃烧室；5—喷嘴；6—燃烧室；7—冷却套；
8—喷管；9—压缩气体气瓶；

A—氧化剂贮箱；B—燃烧剂贮箱；B—水贮箱(冷却辅助发动机燃烧室用)

其构造形式称作涡轮泵组合件，在安装短时间作用型液体火

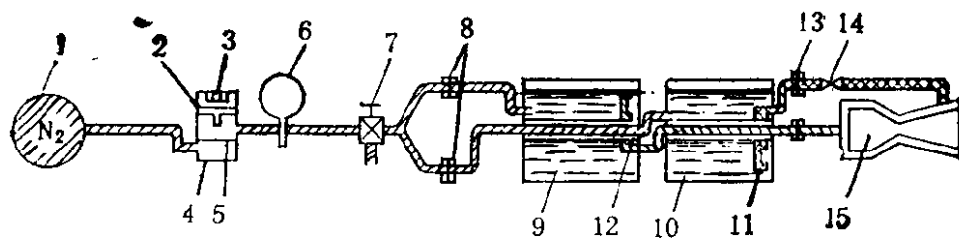


图 1-3 安装气瓶式燃料供给系统的液体火箭发动机
(“瀑布”地空导弹的发动机)

- 1—压缩氮气瓶；2—火药装料燃烧时带动的活塞；3—火药装料；4—启动开关；5—启动开关的可裂隔板；6—压力调节器；7—保险开关；8、13—管路中的可裂隔板；
9、10—燃烧剂和氧化剂贮箱；11—软导管；
12—气体导管；14—定径喷嘴；15—燃烧室

箭发动机的小型火箭中，例如防空导弹，可以利用压缩气体（氮或氦）的气瓶式燃料供给系统。研究图1-4所示“V-2”（A-4）火箭发动机的示意图可以得到关于安装液体火箭发动机的发动机装置的复杂程度的概念^[7]，现代洲际火箭和“宇宙神”、“大力神-II”、“雷神”、“土星”、“东方”等型号的运载火箭具有更为复杂的多燃烧室发动机装置。

液体火箭发动机的主要部件是燃烧室和涡轮泵组合件。装液体火箭发动机的发动机装置的构造和工作取决于火箭燃料的性质。使用单元燃料时，发动机装置的原理图是最简单的。当使用双元燃料时，由于必须利用涡轮泵组合件或压缩气体挤压方法分别供给氧化剂和燃烧剂，其工作原理图则十分复杂。当利用泵供给燃料组分时，则需要蒸气-气体发生器，以保证涡轮泵组合件涡轮的旋转，发生器用主燃料或辅助燃料工作(图1-5和1-6)。当在液体火箭发动机内使用自燃燃料时，发动机开始启动比较容易，而当使用非自燃燃料时，则

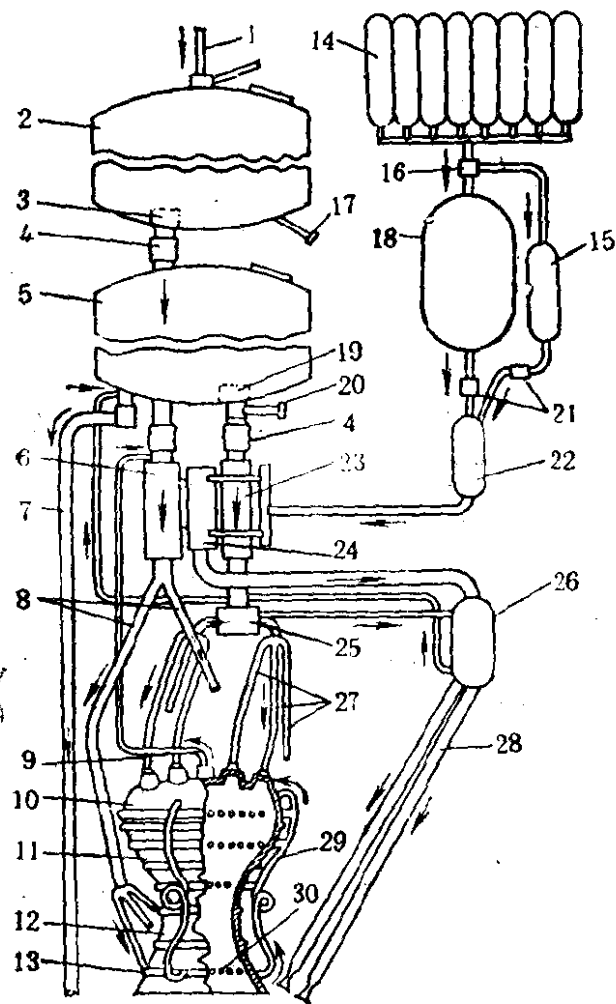


图 1-4 V-2(A-4)火箭的发动机装置示意图

- 1—贮箱增压管（借助速度压差）；2—燃烧剂（酒精）贮箱；
 3—燃烧剂消耗开关；4—波纹管；5—氧化剂（液氧）贮箱；
 6—燃烧剂供给泵；7—氧化剂排放管；8、29—燃烧剂供给导管；
 9—导流管（用于降低推力）；10—发动机头部；11—燃烧室；
 12—发动机喷管；13—燃烧剂进入冷却套的入口；
 14—压缩氮气瓶；15—高锰酸钾溶液贮箱；
 16—减压器；17、20—加注短管；18— H_2O_2 贮箱；
 19—氧化剂消耗开关；21—消耗开关；
 22—蒸气-气体发生器；23—氧化剂供给泵；
 24—涡轮；25—分配器；
 26—热交换器；27—氧化剂供给导管；
 28—废蒸气排出口；30—内冷却圈孔

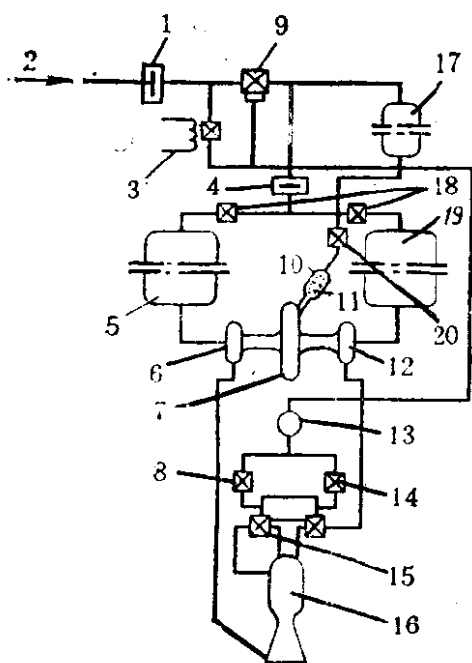


图 1-5 液体火箭燃料组分的涡轮泵供给系统（涡轮用过氧化氢工作）示意图

1—高压调节器；2—高压输入；
3—电磁开关；4—低压调节器；
5—燃烧剂贮箱；6—燃烧剂泵；
7—涡轮；8—切断开关；9—增压
管路开关；10—气体发生器；
11—催化剂束体；12—氧化剂泵；
13—蓄压器；14—节流开关；
15—燃烧剂和氧化剂开关；
16—液体火箭发动机燃烧室（用
燃烧剂冷却）；17— H_2O_2 贮箱；
18—增压开关；19—氧化剂贮箱；
20—气体发生器开关

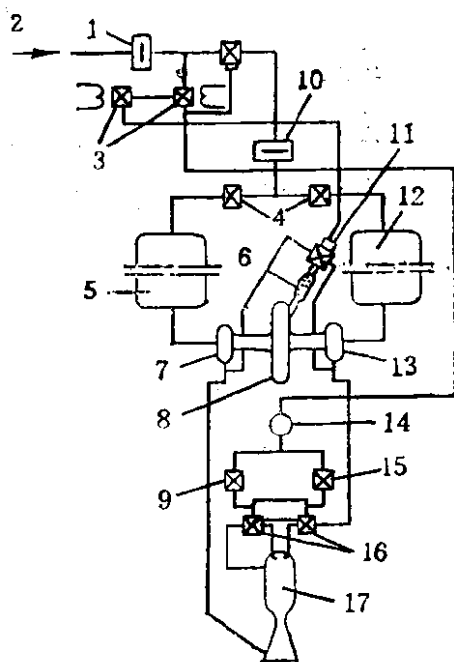


图 1-6 液体燃料组分的涡轮泵供给系统（涡轮用主组分工作）

1—高压调节器；2—高压输入；3—电
磁开关；4—增压开关；5—燃烧剂
贮箱；6—气体发生器；7—燃烧剂
泵；8—涡轮；9—切断开关；10—低
压调节器；11—气体发生器开关；
12—氧化剂贮箱；13—氧化剂泵；
14—蓄压器；15—节气开关；16—燃
烧剂和氧化剂开关；17—发动机燃烧
室（用燃烧剂冷却）

必须专门的发火装置（火药发火、电发火等）或使用称作“启动”燃料的燃烧剂，以保证主燃料组分的化学点燃^[2,7]。