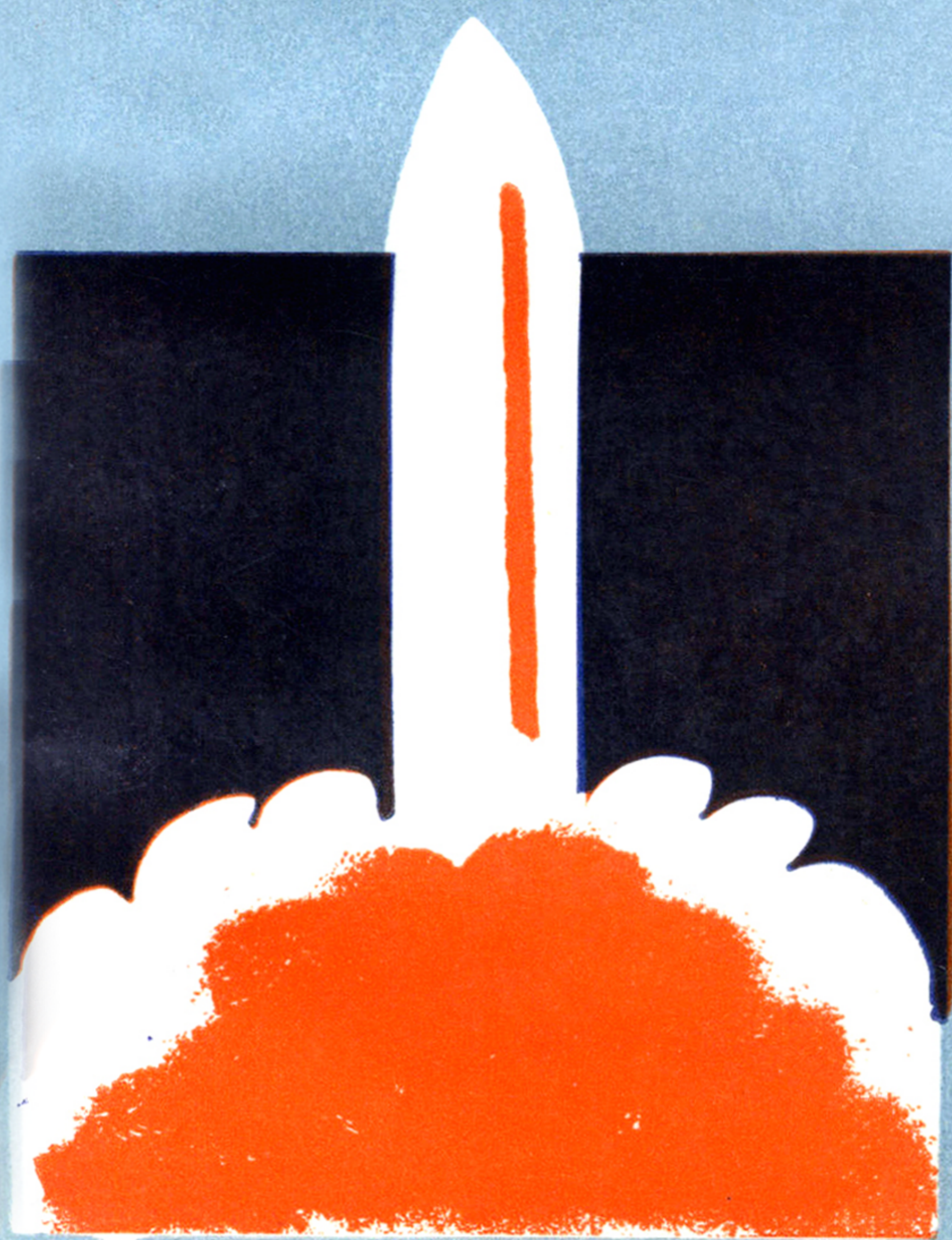


固体火箭 发动机 原理

张平 孙维申 眭英 编著



北京理工大学出版社

固体火箭发动机原理

张 平 孙维申 睦 英 编著

北京理工大学出版社

(京)新登字 149 号

内 容 简 介

本书从介绍热机和化学火箭发动机工作过程的基本原理出发,着重阐明固体推进剂火箭发动机工作的基本规律和主要特性。全书共九章,内容包括:绪论、火箭发动机的工作原理、主要性能参数、热力计算,固体火箭发动机内的流动过程、稳态和非稳态燃烧过程、内弹道计算,以及固体火箭发动机技术的发展方向等。

本书注意基本概念的阐述、工程计算方法的应用,以及物理现象的理论分析。各章中编有例题,各章末有思考题和习题,附录中列有计算所需的基本数据。

本书可作为高等院校工科火箭发动机专业本科生的主要教材之一,也可供有关专业的师生和科技人员参考。

固体火箭发动机原理

张 平 孙维申 眭 英 编著

*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京地质印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 32开本 13.375 印张 359 千字

1992 年 4 月第一版 1992 年 4 月第一次印刷

ISBN 7-81013-490-6/TH·48

印数: 1—1600册

定价: 4.35元

前 言

本书是为高等院校工科火箭发动机专业本科生编写的一本主要专业课教材，讲授时数 60 学时。

本课程的先修课程有“工程热力学”、“气体动力学”、“传热学”、“固体推进剂化学”等。

本书从介绍热机和火箭发动机工作的基本原理出发，引出并重点介绍固体火箭发动机工作中遇到的特殊问题。在内容的编排上，采取由表及里、先易后难、温故知新的原则；在内容的取舍上，注意基本概念的叙述、工程计算方法的应用，以及本学科领域内先进知识和科研成果的介绍。尽量减少繁琐的数学推导和不必要的重复内容，力求体现教材的思想性、科学性、启发性、先进性和适用性。

本书的基本内容主要包括以下三个方面：发动机工作过程和原理的阐述；发动机工作性能的工程计算；发动机内出现的各种现象的理论分析与解释。这三个方面的内容贯穿在本书的各章中。全书共分九章。前四章主要讲述火箭发动机工作原理中的共性部分，后五章则主要讲述固体推进剂火箭发动机工作的特殊问题。考虑到学习内容上的连贯性和渐进性，将发动机中的流动过程安排在燃烧过程之前讲述。

为了加深学生对课程基本内容的理解和基本计算方法的掌握，书中有关章节中编有若干例题，章末附有思考题、习题，书末附有工程计算用的十种附表和供查阅用的主要参考文献目录。

本书中的单位全部采用《中华人民共和国法定计量单位》，专业符号及术语尽量符合国标或部标的规定，并适应本专业习惯的要求。

本书是北京理工大学固体火箭发动机教研室在总结多年教

学、科研实践和教材编写经验的基础上,参考了国内外近年出版的有关教材和专著编写而成的。其中第一、二、三、五、九章由张平编写,第四章初稿由朱荣贵编写(其中§4.10由张平编写),第六、七章由孙维申编写(其中§6.4由张平编写),第八章和附录由睦英编写。全书由张平任主编,并统一组织定稿。

本书由哈尔滨船舶工程学院张唯教授主审,责任编委余超志副教授复审,他们都提出了很多宝贵意见,保证了书稿的质量。在出版过程中还得到了兵工教材编审室主管编辑夏咸松副教授和北京理工大学出版社责任编辑余世芳副教授的大力协助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平和经验所限,书中难免有不当之处,恳请读者批评指正。

编者
1991年5月

目 录

主要符号

第一章 绪论

§ 1.1 火箭发动机的定义与分类..... (1)

§ 1.2 火箭发动机的发展简史..... (6)

§ 1.3 固体火箭发动机的特点与应用..... (9)

思考题 (13)

第二章 火箭发动机的工作原理和排气特性

§ 2.1 火箭发动机的工作原理和基本组成..... (14)

§ 2.2 理想火箭发动机..... (16)

§ 2.3 喷管理论及其基本关系式..... (19)

§ 2.4 火箭发动机的排气特性..... (36)

思考题 (40)

习题 (41)

第三章 火箭发动机的主要性能参数

§ 3.1 推力..... (42)

§ 3.2 推力系数..... (48)

§ 3.3 有效排气速度..... (52)

§ 3.4 特征速度..... (54)

§ 3.5 总冲..... (55)

§ 3.6 比冲..... (58)

§ 3.7 其它参数及参数间的相互关系..... (65)

§ 3.8 效率与品质系数..... (69)

思考题 (73)

习题 (74)

第四章 火箭发动机的热力计算

§ 4.1 热力计算的任务和内容..... (75)

§ 4.2 化学热力学和动力学的基本概念..... (76)

§ 4.3	推进剂的假定化学式	(84)
§ 4.4	质量守恒方程和化学平衡方程	(90)
§ 4.5	燃烧产物平衡组分的计算方法	(94)
§ 4.6	能量守恒方程与总焓的计算	(112)
§ 4.7	燃烧室中燃烧产物热力参数及熵的计算	(115)
§ 4.8	喷管膨胀过程中热力参数的计算	(118)
§ 4.9	火箭发动机理论性能参数的计算	(123)
§ 4.10	热力计算的通用计算机程序	(124)
	思考题	(128)
	习题	(128)
第五章	固体火箭发动机中的流动过程	
§ 5.1	燃烧产物流动的基本方程	(130)
§ 5.2	燃烧产物在燃烧室中的流动规律	(138)
§ 5.3	喷管中的二相流动理论	(155)
§ 5.4	喷管流动过程中的各种损失	(168)
§ 5.5	实际发动机的性能预估	(175)
	思考题	(178)
	习题	(179)
第六章	固体火箭发动机中的稳态燃烧过程	
§ 6.1	概述	(180)
§ 6.2	固体推进剂的稳态燃烧过程	(184)
§ 6.3	固体推进剂的燃速特性	(198)
§ 6.4	固体推进剂中金属添加剂的燃烧	(219)
	思考题	(225)
	习题	(226)
第七章	固体火箭发动机中的非稳态燃烧过程	
§ 7.1	不稳定燃烧概论	(227)
§ 7.2	不稳定燃烧的现象和分类	(229)
§ 7.3	线性声不稳定燃烧	(235)
§ 7.4	固体火箭发动机线性稳定性预估	(248)
§ 7.5	整体振型不稳定燃烧	(256)
§ 7.6	点火与熄火	(261)
	思考题	(268)

习题	(268)
第八章	固体火箭发动机的内弹道计算	
§ 8.1	内弹道计算的任务	(270)
§ 8.2	燃烧室压强的变化	(271)
§ 8.3	零维内弹道计算的基本方程	(273)
§ 8.4	燃烧室压强-时间曲线的简化计算.....	(283)
§ 8.5	影响燃烧室内平衡压强的因素及平衡压强的 稳定性.....	(297)
§ 8.6	有侵蚀燃烧效应时燃烧室压强的计算方法	(305)
思考题	(311)
习题	(312)
第九章	固体火箭发动机技术的进展及发展动向	
§ 9.1	固体火箭发动机设计技术的发展	(313)
§ 9.2	固体推进剂的发展动向	(316)
§ 9.3	固体火箭发动机燃烧理论和测试技术的发展	(318)
§ 9.4	固体火箭发动机计算机辅助设计与数学仿真技术的 进展.....	(320)
§ 9.5	固体火箭发动机推力控制能力的改善	(322)
附录		
附表 1	$\Gamma(k)$ 数值表	(324)
附表 2	亚声速段和超声速段的 p/p_c 与 A/A_t 、 k 的关系表	(325)
附表 3	气体动力学函数表.....	(330)
附表 4	大气性质表.....	(348)
附表 5	特征推力系数 C_F^0 表	(349)
附表 6	某些推进剂组分的标准生成焓表.....	(353)
附表 7	某些化学反应的平衡常数表.....	(356)
附表 8	某些燃烧产物的总焓表.....	(374)
附表 9	某些燃烧产物在一个物理大气压下的熵值表.....	(387)
附表 10	某些燃烧产物的定压比热表.....	(388)
参考文献	(411)

主要符号

英文

A	截面积
A_b	声导纳函数
a	燃速系数、声速 (第七章)
C_D	流量系数
C_F	推力系数
c	声速、凝相比热
c^*	特征速度
c_*	临界声速
c_p	定压比热 \ominus
c_v	定容比热
d	直径
E	内能、总声能
e	比内能
e_k	比动能
e_p	比势能
F	推力、拉格朗日变换式
F	燃烧剂
F_D	粘性阻力
f	频率
f_D	比粘性阻力
f_p	定压火药力
G	吉布斯自由能、外力
G^0	标准压强下的自由能
g	重力加速度、比吉布斯自由能
g_0	标准地面重力加速度

\ominus 比热即比热容。

H	焓、高度
H_f	生成焓
h	比焓
h_f	比生成焓
I	总冲、总焓
I_{sp}	比冲
i	比总焓
J	喉通比
K	复波数
K_N	面喉比
K_p	化学反应平衡常数
k	比热比
L	距离、装药长度
L^*	特征长度
l	距离
M	马赫数
\mathcal{M}	千摩质量 (分子量)
m	质量
\dot{m}	质量流量、质量燃速
N	元素的原子总数
n	摩尔数、压强指数
O	氧化剂
p	压强
Q	热量、吉布斯自由能函数的近似值
\dot{Q}	单位时间的热量
q	比热量
\dot{q}	单位时间单位质量的热量
R	气体常数
R_b	响应函数
R_0	通用气体常数
r	燃速
S	熵、燃烧表面积
s	比熵、燃烧周边长

T	温度
t	时间
t_u	工作时间
t_b	燃烧时间
u	流动或振动速度
V	体积
v	比容、飞行速度
x	组元在推进剂中的质量分数
Y	声导纳、摩尔数初值

希腊文

α	喷管扩张半角、振幅增长系数
Γ	比热比函数
δ	厚度、相对比热、损失系数
ε	侵蚀比、凝相质量比、凝相产物的质量分数、误差限值
ε_A	扩张比 (面积比)
ε_p	膨胀比 (压强比)
ζ	局部阻力系数
η	效率、因子
η_t	热效率
θ	角度、降压时间
ω	面通比
λ	速度系数、导热系数
λ_k	拉格朗日乘数
μ	化学位、动力粘度
ξ	品质系数、凝相颗粒浓度
π_K	压强温度敏感系数
$\pi_{p/r}$	定 p/r 比压强温度敏感系数
ρ	密度
σ	总压恢复系数
σ_K	定面喉比燃速温度敏感系数
σ_p	燃速温度敏感系数
τ	时间、摩擦应力
τ^*	滞留时间

φ 修正系数、相位差

α 散热系数

ω 圆频率

上 标

— 平均值、浓度、二相混合物

~ 无量纲数

\wedge 某位置 x 处

上角标

0 特征值、绝对零度、标准压强

, 扰动量

T_s 标准温度

下角标

a 环境的、加速度

b 燃烧、燃面

bl 边界层

c 燃烧室、喷管入口、凝相、对流

ch 化学能

d 衰减

div 扩张

e 喷管出口、外部的、平衡流

ef 有效值

eq 平衡值

ex 外部的

exp 实验值

f 生成、冻结流

G 地面的、增益

g 气相的

i 初始值、内部的、虚数、数组

ig 点火的

in 内部的

j 数组

kin 动力学的

L 装药末端、极限值

<i>m</i>	燃烧产物、二相混合物
<i>N</i>	喷管
<i>n</i>	喷管、摩尔数
opt	最佳值
<i>p</i>	推进剂、微粒、推进、通道、压强
pre	预估值
<i>r</i>	辐射
<i>S</i>	燃烧表面
SN	喷管滞止状态
st	标准元素
sub	潜入
<i>t</i>	喷管喉部
th	理论值
tp	二相流
<i>u</i>	气流速度
<i>V</i>	真空的
<i>v</i>	比容
<i>W</i>	壁面
0	滞止、燃烧室、头部、零-峰幅值
1	装药头端
2	装药末端
3	装药中间部位

第一章 绪 论

§ 1.1 火箭发动机的定义与分类

依靠高速喷射气流产生的直接反作用力推动物体运动的装置称为喷气发动机。喷气发动机已广泛用作飞机、火箭、导弹、宇宙飞船及航天飞机等各种飞行器的动力装置。

喷气发动机可分为空气喷气发动机和火箭发动机两大类。凡是利用周围大气作为氧化剂而自身只带燃烧剂（燃油）的喷气发动机称为空气喷气发动机，如涡轮喷气发动机和冲压喷气发动机等。

凡是自身既携带燃烧剂又携带氧化剂而不需周围大气作氧化

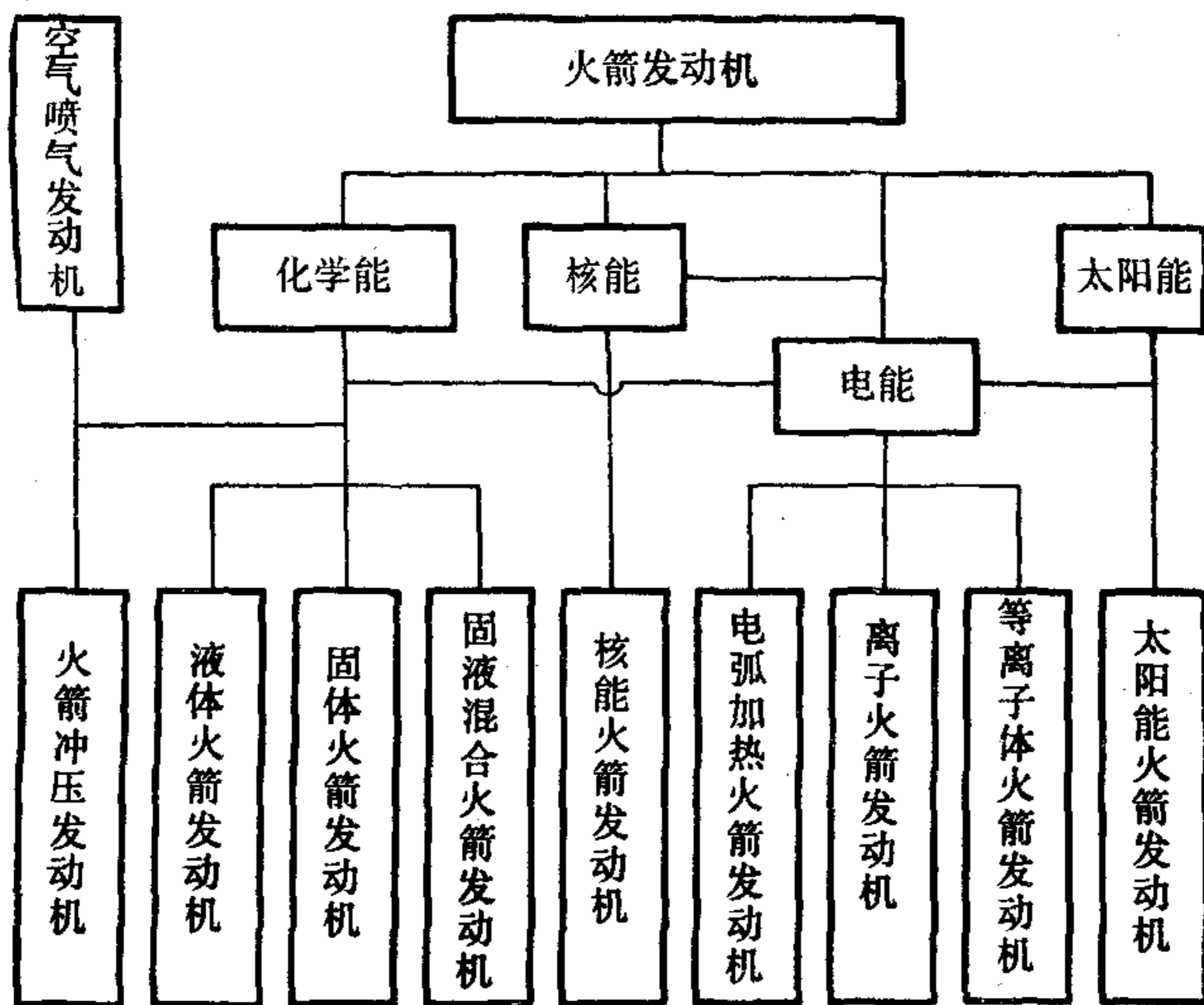


图 1-1 火箭发动机分类图

剂的喷气发动机称为火箭发动机。因此，它既可在大气层内工作，也可在大气层以外的太空中工作。

由上述定义可知，火箭发动机的特点是自身携带推进所需的全部物质（包括能源和工质）。火箭发动机的种类很多，通常根据其能源种类的不同，将它分成化学能、核能、电能和太阳能火箭发动机等几类（图 1-1），下面分别对各类火箭发动机作一简单介绍。

一、化学能火箭发动机

依靠推进剂的化学能作为能源的火箭发动机称为化学能火箭发动机（简称化学火箭发动机），它是目前技术最为成熟、使用最为广泛的一种火箭发动机。依靠推进剂在高压燃烧室内进行化学反应释放的能量，将工质加热到很高的温度（2500~4000 K），然后在喷管中膨胀加速到 2000~4700 m/s 的速度喷出。根据推进剂物理性态的不同，又可将化学能火箭发动机分成液体、固体和固液混合型火箭发动机等几类[⊖]，其中大量使用的是液体和固体火箭发动机。图 1-2、图 1-3 和图 1-4 分别为液体火箭发动

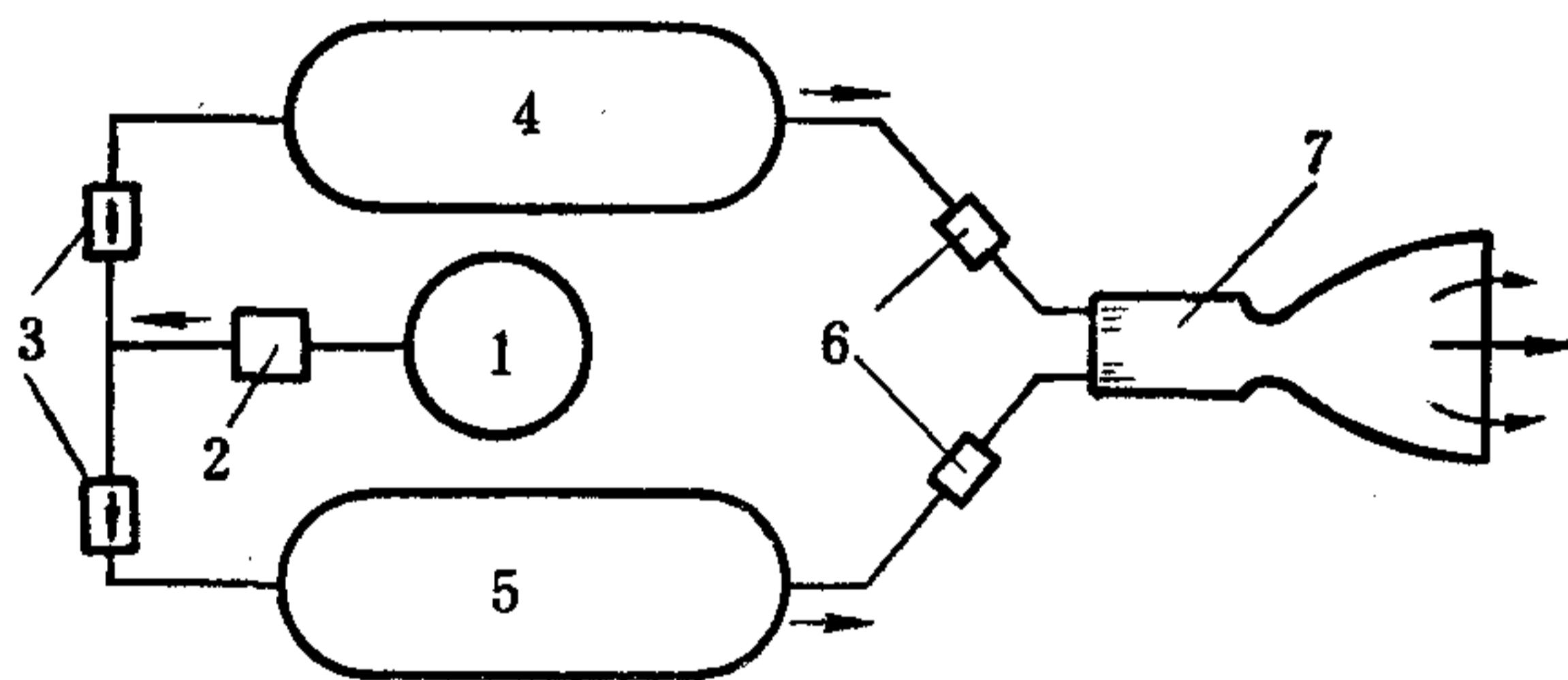


图 1-2 挤压式输送系统液体火箭发动机示意图

1—高压气瓶；2—减压器；3—单向阀；4—氧化剂贮箱；5—燃烧剂贮箱；
6—自控阀；7—火箭推力室

⊖ 根据推进剂的物理性态，还有一种气体火箭发动机。它采用可贮存的高压气体作为工质或推进剂。早期的航天飞行器上曾采用过此类火箭发动机作为姿态控制系统。

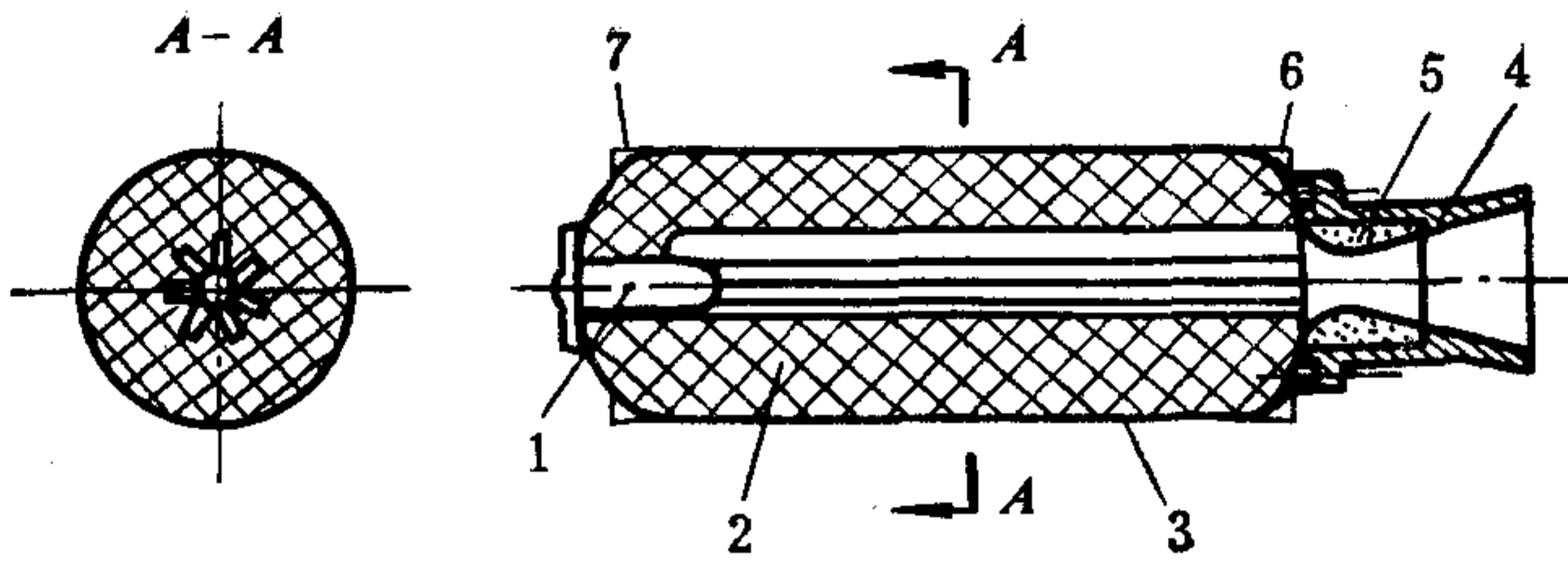


图 1-3 固体火箭发动机结构简图

1—点火器；2—固体装药；3—燃烧室壳体；4—喷管；5—喉衬；6—后连接裙；
7—前连接裙

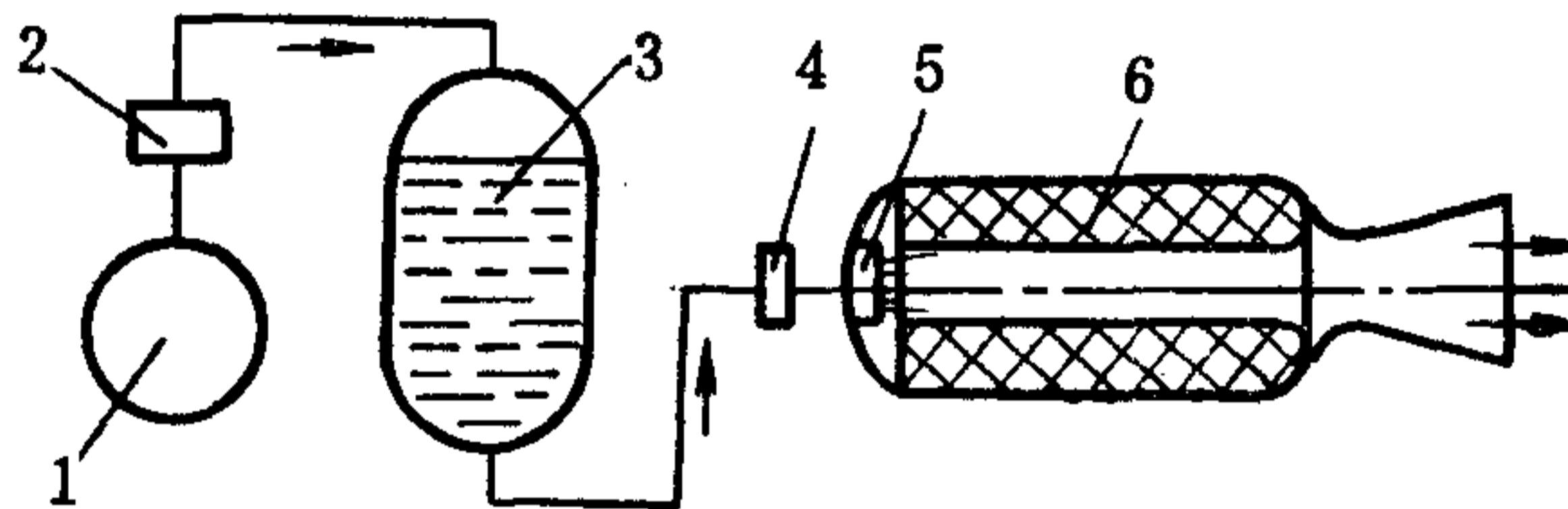


图 1-4 固液混合火箭发动机示意图

1—高压气瓶；2—减压器；3—液体推进剂贮箱；4—阀门；5—液体喷头；
6—固体装药

机、固体火箭发动机和固液混合火箭发动机的组成示意图。

化学火箭发动机和冲压式空气喷气发动机相结合，还可组成火箭冲压发动机。火箭冲压发动机有很多优点，它已成功地用在地-空等导弹上，如苏联的“萨姆-6”防空导弹等。

二、核能火箭发动机

核能火箭发动机（简称核火箭发动机）的能源不像化学火箭发动机那样来自推进剂内部，而是来自工质外部的核反应堆。可以用三种方式获得核能，即原子的裂变、聚变和放射性同位素的衰变。图 1-5 是采用铀裂变反应的核火箭发动机示意图。裂变产生的热能加热工质（通常为液氢），并通过喷管将其加速到 $6000 \sim 10000 \text{ m/s}$ 的高速度。这类发动机存在的主要问题是反应堆的高温（高于 2500 K ）和放射性造成的危害，对此，目前仅处于研制阶段。

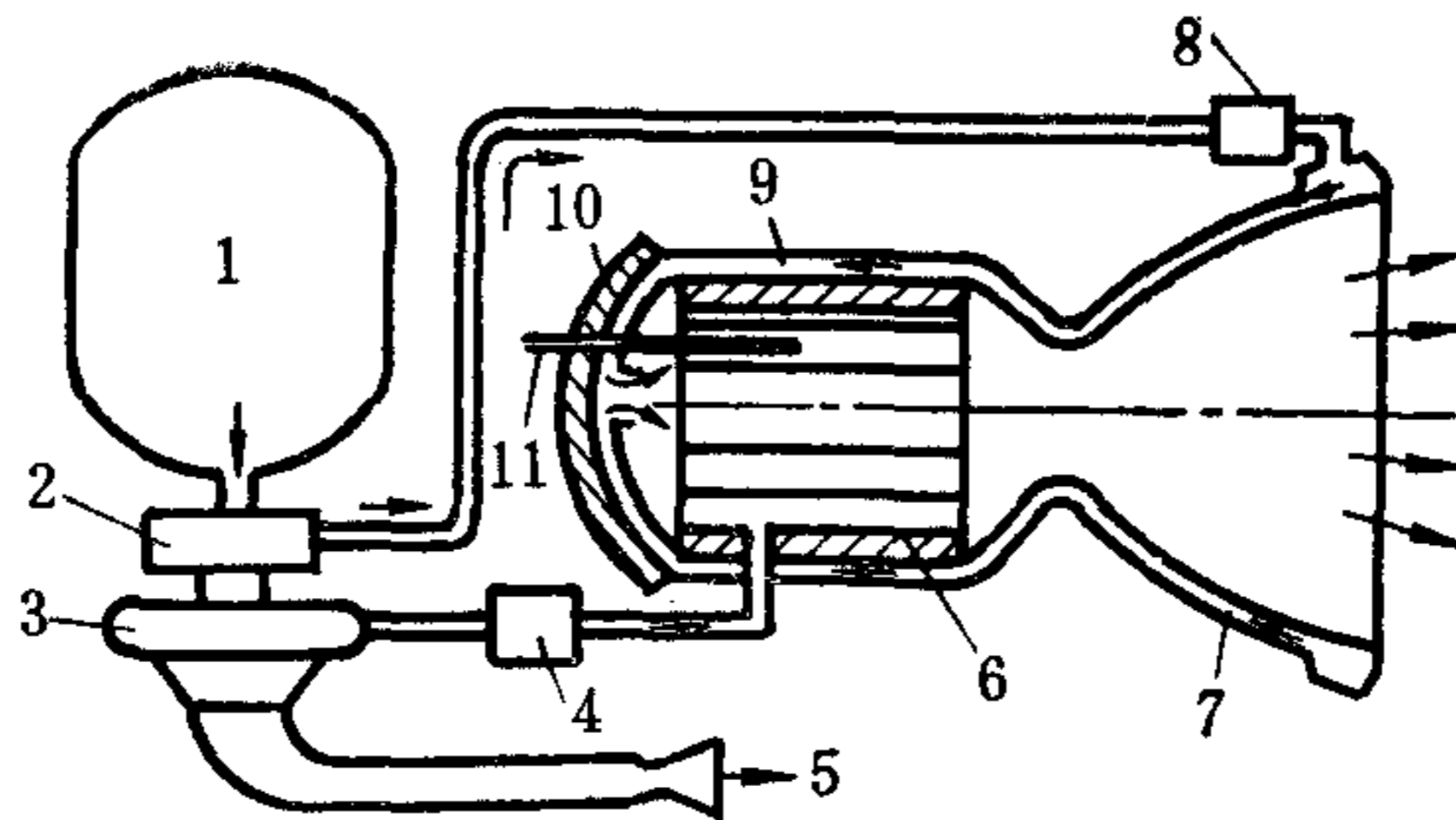


图 1-5 采用铀裂变反应堆的核火箭发动机示意图
 1—液氢贮箱；2—泵；3—涡轮；4—阀门；5—涡轮废气；6—核反应堆；
 7—喷管；8—阀门；9—冷却套；10—防护罩；11—控制杆

三、电能火箭发动机

依靠电能作为能源的火箭发动机称为电能火箭发动机（简称电火箭发动机）。电能一般可从化学能、核能或太阳能转变而来。电能火箭发动机主要有三种类型。第一种是电弧加热型火箭发动机（图 1-6），电能在两个电极之间形成的弧光中转变为热能，

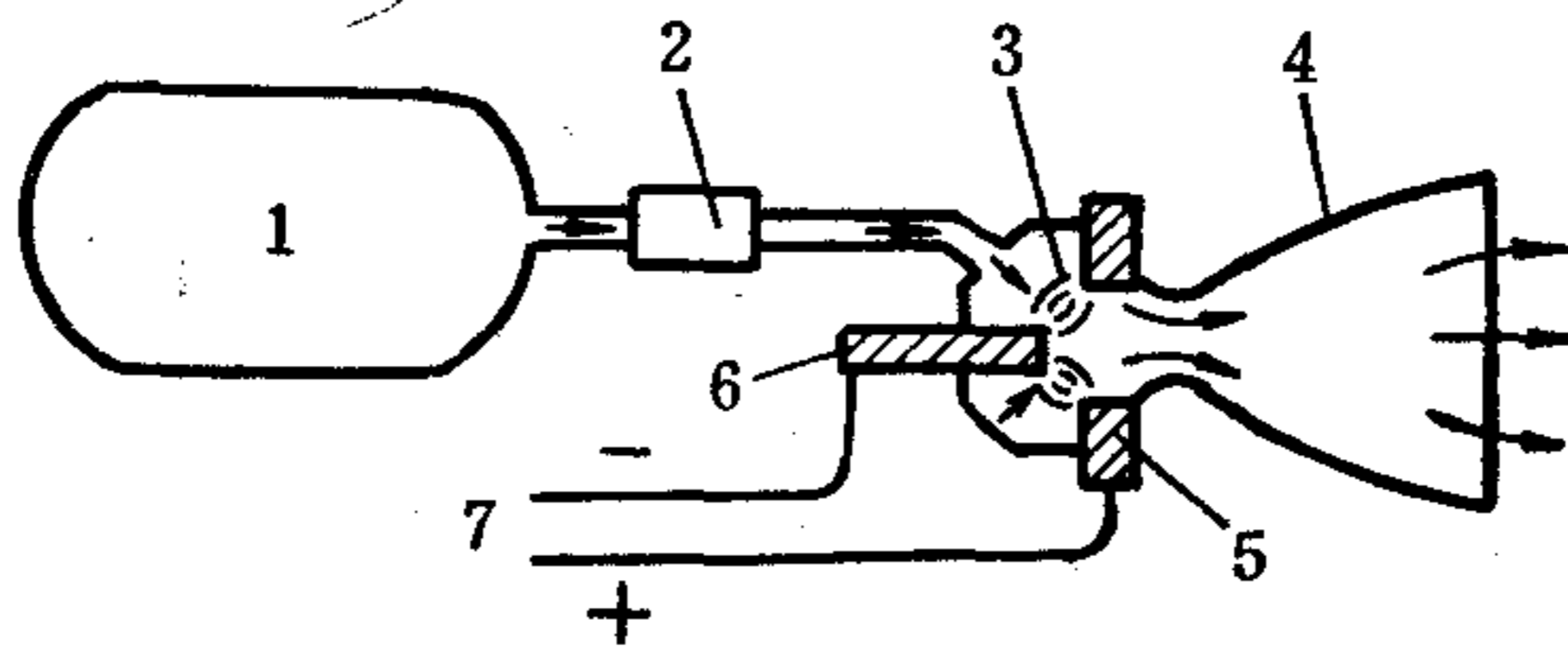


图 1-6 电弧加热型火箭发动机示意图
 1—工质；2—泵；3—两电极间的环形电弧；4—喷管；5—环形正极；6—负极；
 7—由电源来的低电压大电流电能

当工质（氨、氢、氮、肼等）通过电弧时被加热，然后，加热了的气体工质经喷管膨胀加速到 $1000\sim 3000\text{ m/s}$ 的速度。其它两种是静电（或离子）推进发动机和电磁（或磁等离子体）发动机。它们的推进原理与第一种不同。在离子发动机中，工质（汞或铯）被电离成离子，它们在静电场中可加速到 $4000\sim 60000\text{ m/s}$ 的高速度，这种带电重离子经中性化后（为了防止对飞行器建立不利的空间电荷场）被喷出（图 1-7）。在磁等离子体发动机