

6.单组元液体推进系统

- 6.1. 总体技术 3
 - 6.1.1.脉冲性能 4
 - 6.1.2.首次脉冲 7
 - 6.1.3.推进器使用寿命 8
 - 6.1.4.推进剂装载清单 9
 - 6.1.5.零重力推进剂控制 10
 - 6.1.6.推进剂称重 12
 - 6.1.7.典型单组元肼推力器 13
- 6.2. 单组元发动机的基本组成和结构 14
- 6.3. 单组元推进剂 16
 - 6.3.1.肼（N₂H₄） 19
 - 6.3.2.硝酸羟铵（HAN）混合物 20
 - 6.3.3.过氧化氢（H₂O₂） 21
 - 6.3.4.混肼 22

6.4.	肼分解	24
6.5.	催化剂床设计	27
6.5.1.	床载荷和床直径	27
6.5.2.	催化剂床长	28
6.5.3.	催化剂床结构	31
6.5.4.	催化剂床压降	32
6.6.	喷注器设计	33
6.6.1.	设计准则	33
6.6.2.	喷注器压降与室压选择	35
6.6.3.	喷注器结构形式	36
6.7.	喷管设计	37
6.8.	过氧化氢(H ₂ O ₂)单组元发动机	38
6.8.1.	工作原理	38
6.8.2.	催化剂形式	40

6.1.总体技术

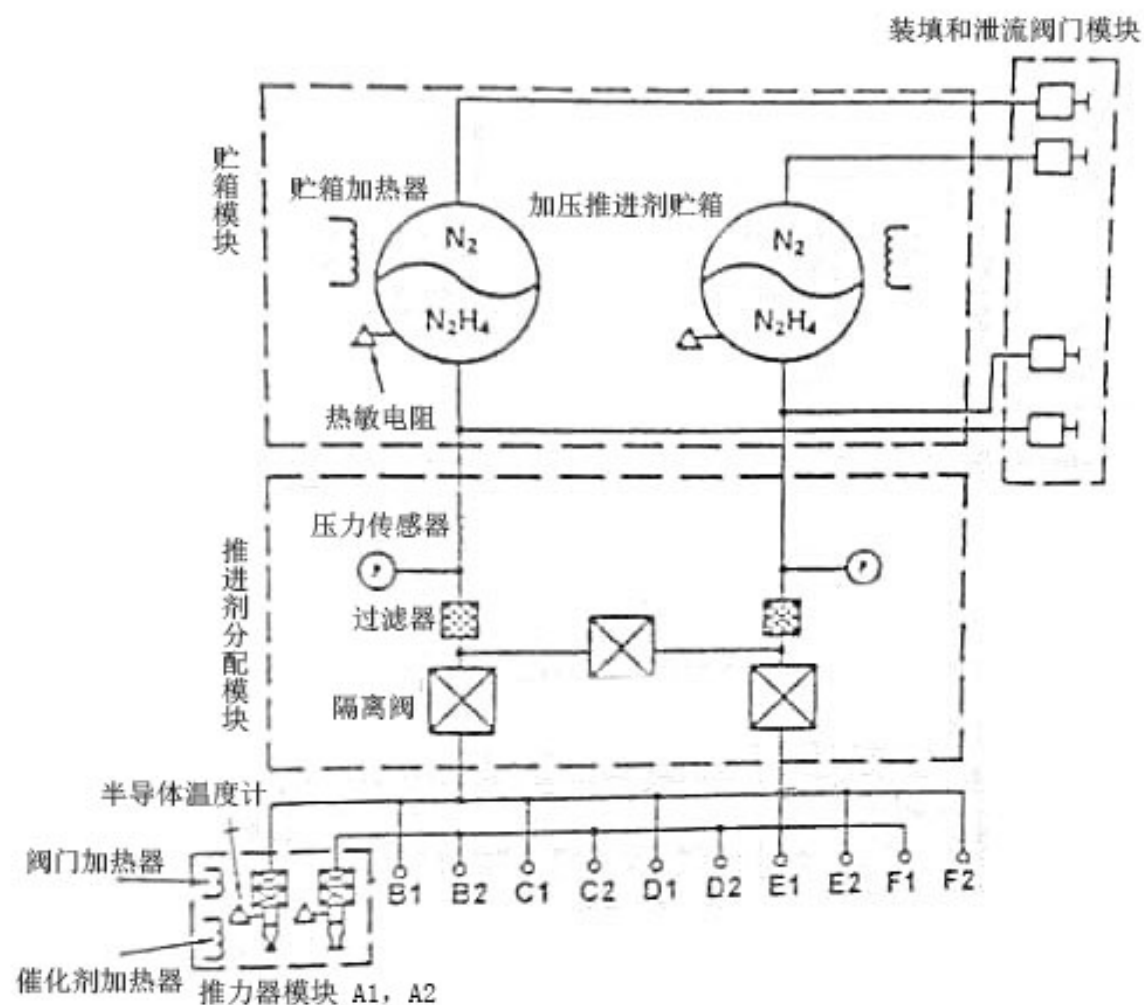


图 1 落压式单组元推进系统

6.1.1. 脉冲性能

单组元发动机使用模式包括：稳态工作和脉冲工作。

点火脉冲产生涉及推进剂电磁阀，管路，推力室。

压力反应时间：从推进剂电磁阀控制信号开始到稳态推力室压力的某一百分比的时间。反应时间影响因素：

- 1) 推进剂电磁阀的反应特征；
- 2) 供给管路液压延迟（推进剂从推进剂电磁阀流到推力室的时间）；
- 3) 点火延迟（浸润催化剂和最初分解产生的热量使催化剂达到某一燃烧温度的时间）；
- 4) 压力上升时间（在推力器中分解出足够多的肼以充满空间和加热整个催化剂的时间）。

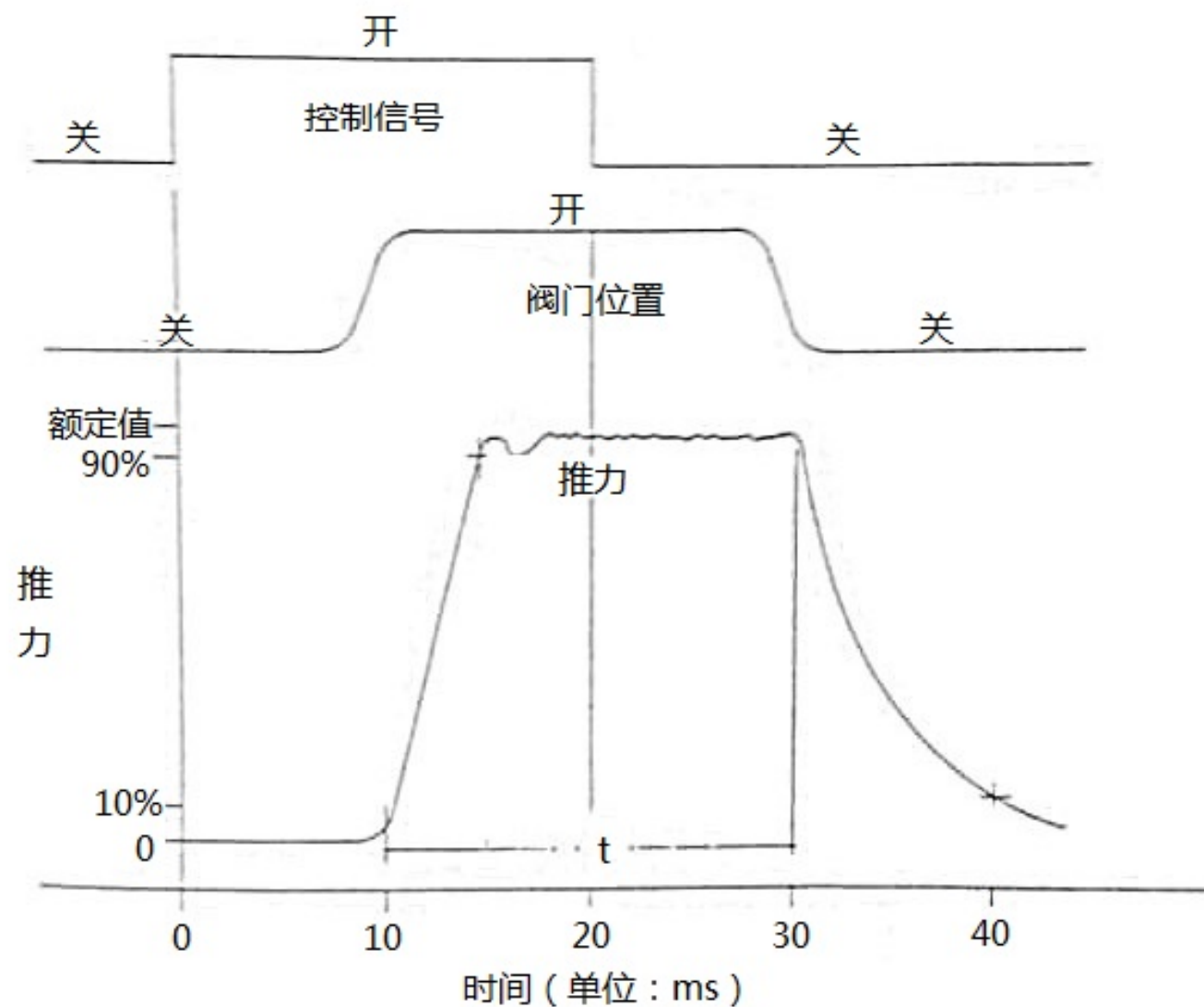


图 2 标准的 20ms 脉冲

脉冲特性包括性能精确性和可重复性

- 稳态推力， $\pm 5\%$ ；稳态比冲， $\pm 2\%$
- 在脉冲序列中，脉冲不会在一个接一个的重复。
- 对于一个给定的发动机，在 5 到 10 个脉冲之后，脉冲长于 1s，脉冲宽度变化会在 $\pm 3\%$ 之间。当缩短脉冲宽度，变化会变大。对于一个脉冲序列，不同脉冲，冲量变化会在 $\pm 10\%$ 之间。
- 不同发动机，冲量变化会附加 $\pm 5\%$ 变化。

负脉冲

- 在稳态燃烧中，经常关机来产生姿态控制力矩（关调制）。

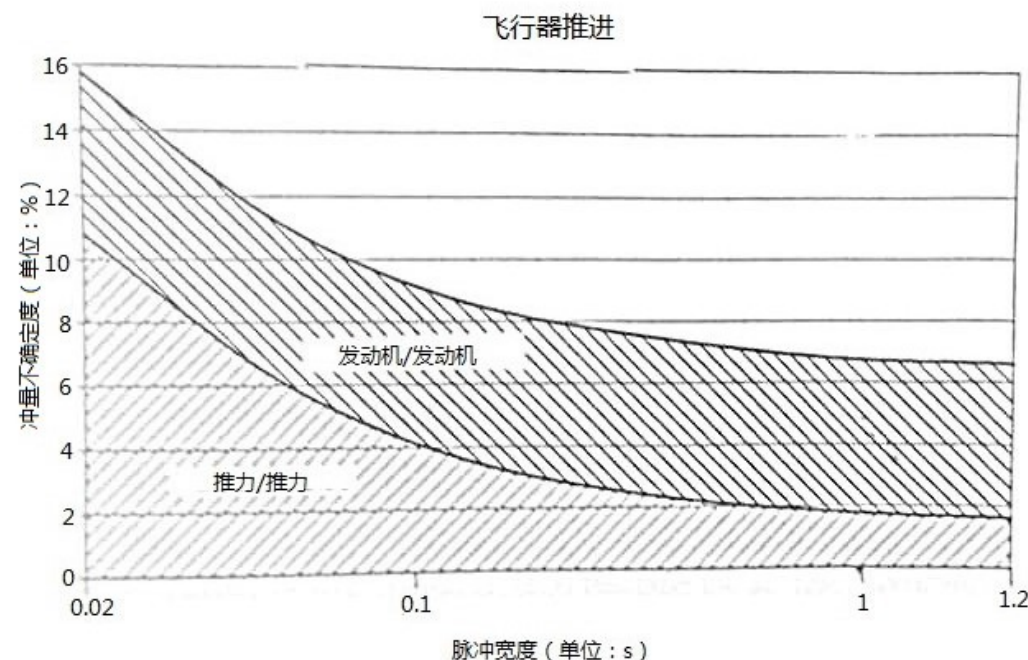


图 3 小型发动机的冲量变化

6.1.2. 首次脉冲

功能：消除分离干扰

- 首次脉冲常用来稳定上一级分离之后的旋转速率。
- 首次脉冲必须可以提供姿态控制系统所需要的总冲

推进系统必须：

- 不含气、少含气
- 从贮箱到推力室都被推进剂充满
 - ◆ 发射前排气
 - ◆ 上一级排气
 - ◆ 本级排气
- 催化剂加热。

6.1.3. 推力器使用寿命

单组元推力器的性能退化发生在催化剂：

- 催化剂颗粒的物理失效；
 - ◆ 冷启动会引起催化剂颗粒的物理损坏。
 - ◆ 冷启动引起的点火延迟会导致推进剂在催化剂上积累。
 - ◆ 冷启动热流冲击催化剂颗粒（温度梯度大），最好是用加热器
 - ◆ 点火时，压力峰冲击催化剂颗粒
- 催化剂颗粒表面的杂质引起的催化剂活性下降（催化剂中毒）。
 - ◆ 催化剂中毒和肼的流量速率成正比；高推力发动机的工作寿命较短。
 - ◆ 使用高纯度肼会减少中毒。

6.1.4. 推进剂装载清单

装载的推进剂质量细分列表：

- 任务（轨道）所需要的推进剂；
- 姿态控制所需要的推进剂。

推进剂装载详细清单：

- 可用推进剂
 - ◆ 额定情况下推进剂需求量，任务机动推进剂；姿态控制推进剂
 - ◆ 最坏的情况下完成任务推进剂需求量
 - ◆ 备用的推进剂：1）寿命期间都需要的；2）在意外情况下做出计划之外的使用；3）在完成基本任务之后扩展任务
 - ◆ 备用的推进剂应不少于可用的 25%。
- 残余推进剂，占可用推进剂的 3%
- 储运损耗（只有双组元推进剂存在），占可用推进剂的 1%
- 漏失，占可用推进剂的 0.5%

6.1.5. 零重力推进剂控制

如果气液混合，气泡的位置在零重力情况下位置不确定

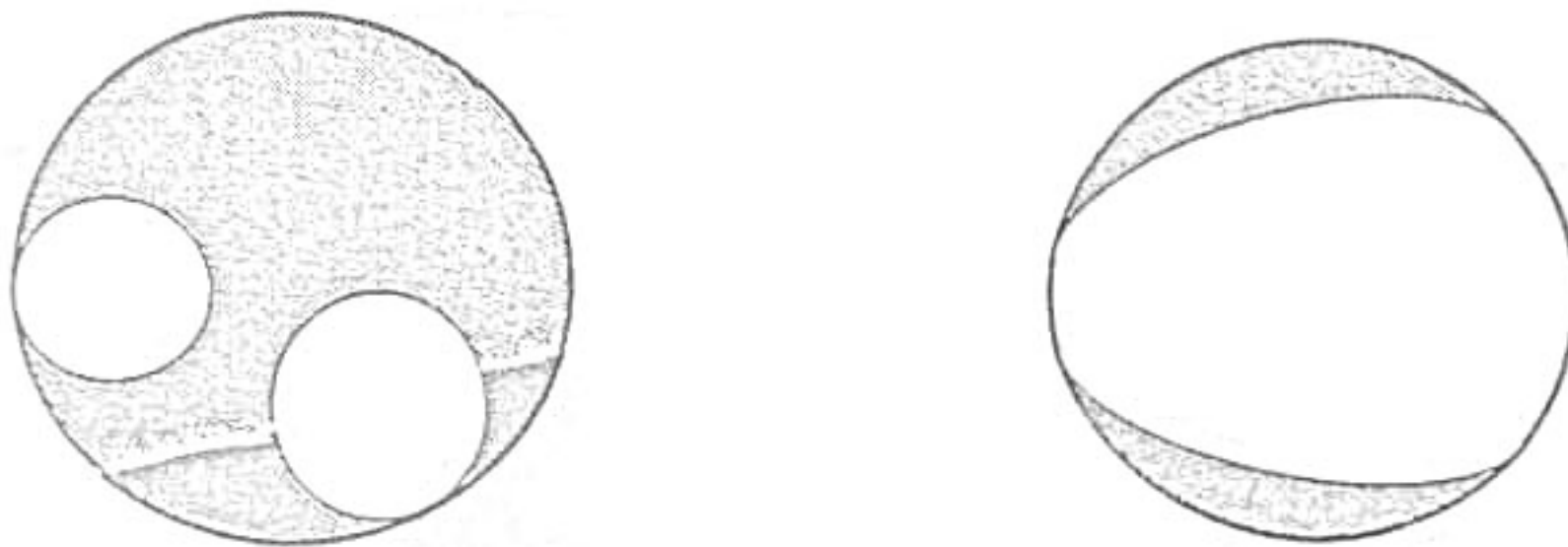


图 4 零重力气泡的形状

如果不能控制气泡的位置，就无法保证气泡不进入并损伤发动机；
发动机吸入小量气体不会出现问题，但设计时要尽量避免任何气体吸入；
自旋稳定的航天器可以利用离心力；
三轴稳定航天器或者小自旋速率航天器使用毛细器件、隔膜、囊等。

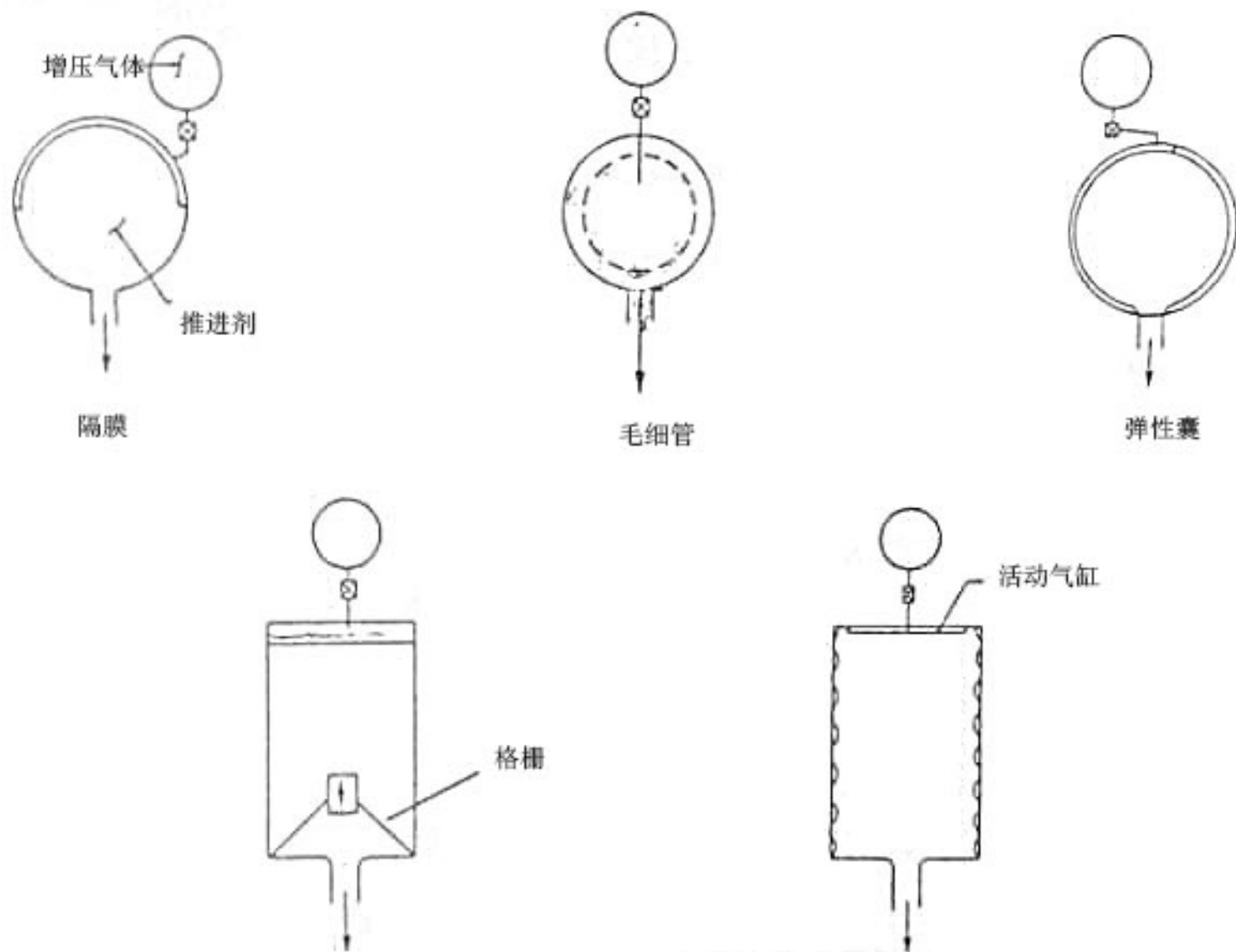


图 5 零重力推进剂控制原理图

6.1.6. 推进剂称重

航天器系统利用重力方法来测量推进剂质量；

推进系统运输到远离航天器的地方并空载称重；

推进剂利用特殊的包装和程序加注；

加注是一件很危险的事情，应制定专门加注方案；

加注后再次称重，两次重量之差就是推进剂重量；

贮存罐推进剂的减少

加注在发射场临近发射时进行。

6.1.7. 典型单组元肼推力器

表 1 典型单组元肼推力器性能指标

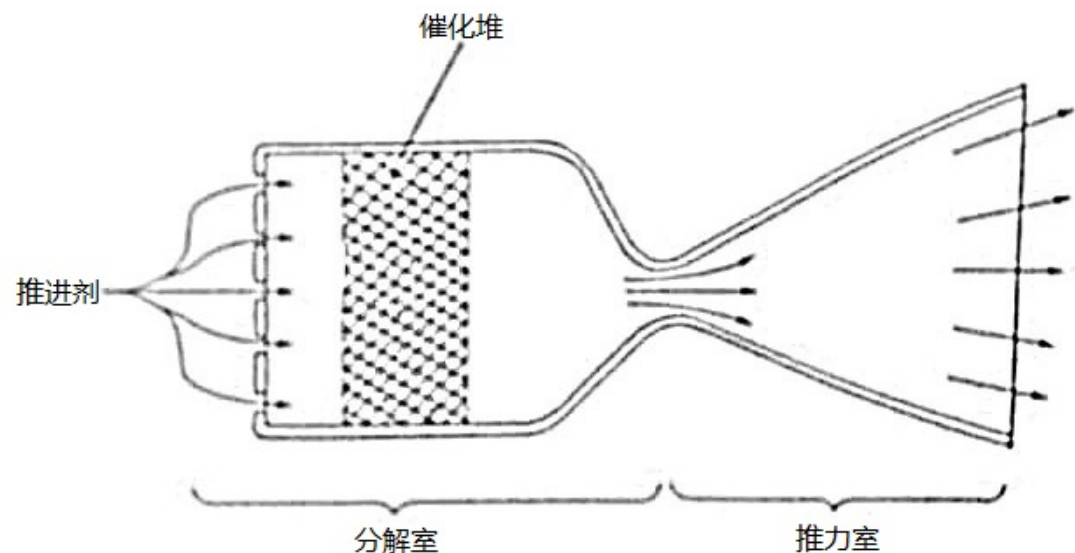
推力 F/N	型号	比冲 I _{sp} /s	质量 W _t /kg	尺寸 (l×Ø)/mm	制造商	备注
0.9	MR-103	210~220	0.33	148×34	Primex	C/E,D 和 G 系列, I _{sp} 、 F 与供应压强 (2.35~0.7 MPa) 相关。
0.9	KMHS 10	226	0.33	146×32	Marquardt	I _{sp} 、 F 与供应压强相关。
1.0	/	223	0.27~0.28	/	Daimler Chrysler	早期 0.5N 和 2.0N 改进型。
2.2	MR-111E	213~224	0.33	169×38	Primex	I _{sp} 、 F 与供应压强 (2.55~0.40 MPa) 相关。
4.45	MR-111C	226~229	0.33	169×38	Primex	I _{sp} 、 F 与供应压强 (2.76~0.55MPa) 相关。
4.45	KMHS 17	230	0.38	203×32	Marquardt	I _{sp} 、 F 与供应压强相关。
5.0	MRE-1	220	0.82	152×N/A	TRW	双模式, I _{sp} 、 F 与供应压强相关。
18.0	MRE-4	230	0.41	203×N/A	TRW	I _{sp} 、 F 与供应压强相关。

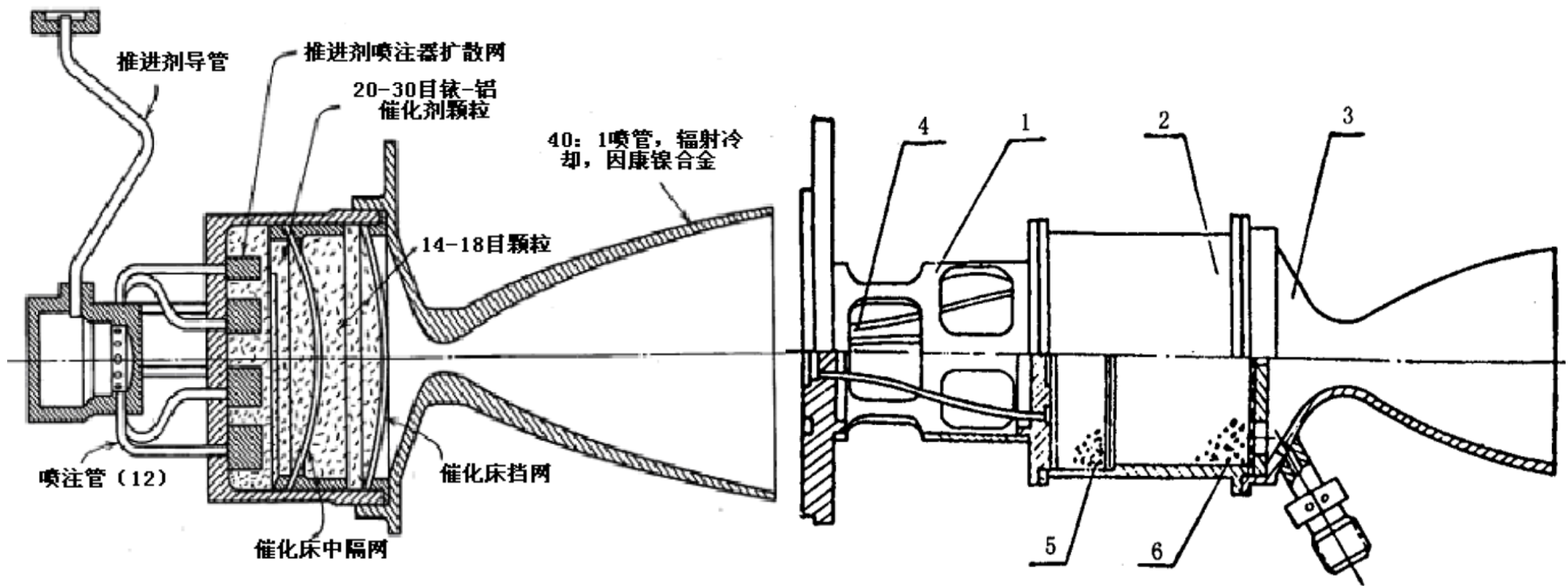
6.2. 单组元发动机的基本组成和结构

单组元发动机通常包括：

- 喷注器
- 催化剂床
- 喷管。

单组元推进剂由喷注器喷入催化剂床，经催化分解生成高温燃气，通过喷管高速喷出产生推力。





1 头部; 2 身部; 3 喷管; 4 喷注器; 5 细颗粒催化剂; 6 粗颗粒催化剂

图 6 单组元分解发动机结构

目: 每平方英寸 (25.4mm) 上孔的数量,

如 20 目- $\Phi 833\mu\text{m}$, 40 目- $\Phi 350\mu\text{m}$, 12 目- $\Phi 1397\mu\text{m}$

6.3. 单组元推进剂

单组元液体推进剂是单一化学物质或几种化学物质的混合物，一般呈液体状态，它在一定条件（高温、高压或催化剂作用）下可分解成燃气，作为发动机的工质。单组元推进剂的主要性能要求包括：

- a. 良好的贮存性能；
- b. 高的稳定性；
- c. 良好的抗冲击、振动、摩擦能力；
- d. 良好的点火和分解性能；
- e. 高的能量、温度适中，成气性好；
- f. 毒性小，对人员和环境污染小；
- g. 与材料的相容性好；
- h. 成本低。

常用的单组元液体推进剂包括：过氧化氢(H_2O_2)、肼(N_2H_4)、一甲基肼(CH_3N_2 , MMH)、硝酸羟铵 (HAN)、混氨、混肼、硝酸丙脂等。

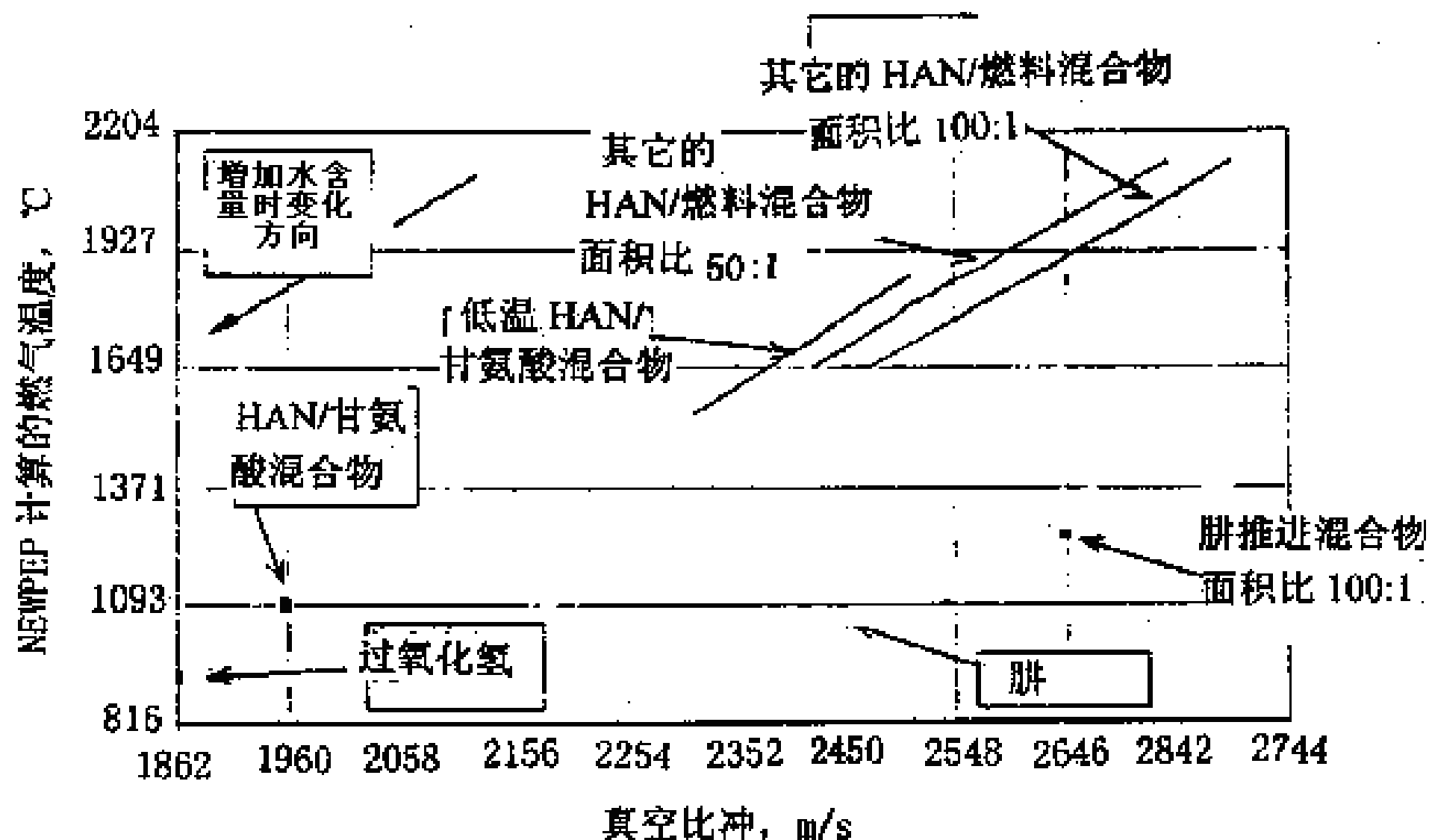


图 7 典型单组元推进剂理论性能

表 2 典型单组元推进剂的物理性能

特性	高纯度肼	HAN-甘氨酸-水	90%过氧化氢
熔点，℃	1.5	<-3.5	-11.5
沸点，℃	113.5	未测量	141.7
比重，g/cm ³	1.0	1.42	1.4
爆炸温度，℃	232	没有获得	149
长期贮存能力	采用惰性气体保护，贮存能力极强	缓慢分解形成酸性测试品	缓慢分解形成水和氧
其他	腐蚀、易燃、有毒	氧化、腐蚀	强氧化性、腐蚀

6.3.1. 肼 (N_2H_4)

基于肼 (N_2H_4) 的单组元发动机:

- 30 多年的工程应用
- 具有大量的研制和使用经验, 已有推力室、贮箱等成熟产品可供选用
- 具有最好的继承性, 技术成熟、可靠性高、成本较低、可长期贮存和稳定性好
- 几乎与大部分材料有非常好的相容性
- 研制出了非常有效的 $\text{Ir}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 体系的催化剂
 - ◆ “希尔” 405 (Shell 405) 肼自发分解的催化剂
 - ◆ 1964 美国加利福尼亚州的“希尔”化学公司
 - ◆ 将活性金属铱 (Ir) 浸渍在高比表面积的 Al_2O_3 载体上
 - ◆ 具有活性高、稳定性好、分解效率高和工作寿命长等优点。
- 绝热分解燃气的温度很低, 约 1000°C , 实际应用中采用最普通的不锈钢就可以满足使用要求。
- 具有一定的毒性, 性能偏低。

6.3.2. 硝酸羟铵（HAN）混合物

硝酸羟铵类单组元推进剂一般是由硝酸羟铵（固体、富氧）、相容性燃料和足量的水（控制火焰温度，溶解状态）组成。

- 蒸气无毒，着火危险性低于肼，冰点低，沸点高，不致癌；
- 与肼相比性能、安全性和使用维护性有所提高。
- 点火后分解，产生雾状 NO_x 和 HNO_3 硝酸
- 需要催化剂床预热（ 316°C ），起动响应时间较长，但稳态性能高。

表 3 硝酸羟铵类推进剂理论性能

推进剂	水含量 %	理论比冲 uL, m/s	实际计算比 冲 ls, m/s	理论特征速度 C* , m/s	燃烧室 温度 $^\circ\text{C}$
硝酸羟铵/甘氨酸	14.7	2421	2303	1296	1704
硝酸羟铵/甘氨酸	21.2	2205	2107	1198	1399
硝酸羟铵/甘氨酸	26.0	2000	1891.4	1092	1093
硝酸羟铵/硝酸三乙醇铵	25.0	2421	2304	/	1649
硝酸羟铵/醋酸	27.5	2030	1911	/	1093
硝酸羟铵/甲酸	33.0	2020	1911	/	1093
硝酸羟铵/乙醇	30.7	2020	1911	/	1093

6.3.3. 过氧化氢 (H_2O_2)

过氧化氢是一种高密度氧化剂 1.4kg/L，具有能放热分解成水蒸气和氧的独特特性，它作为单组元推进剂具有以下特点：

- 密度高，它与硝酸和四氧化二氮密度相当，具有较高的密度比冲；
- 可贮存，在室温下为液态，且有较宽的液态温度范围；
- 无毒环保，无致癌性，对人的影响小，燃烧产物对环境无危害；
- 与大气无反应，对推力室材料没有腐蚀性；
- 蒸汽压低，减少了吸入的危险性；
- 性能稳定，不稳定分解温度为 140°C ，爆炸性分解温度为 150°C 。

过氧化氢催化剂包括：

- 液态高锰酸溶液、氯化铁溶液等，颗粒状氟石、 Al_2O_3 、 SiO_2 等
- 网状镀银、银网等。

6.3.4. 混肼

混肼是指肼、硝酸肼和水的混合物，是一种单组元推进剂：

- 肼冰点较高（ 1.4°C ），不能满足低温环境的使用要求
- 硝酸肼有降低冰点和提高能量的作用，但其含量过高会引起爆轰敏感和分解温度升高
- 水具有降低冰点和分解温度以及抑制爆轰敏感的作用，但含量过高又会降低能量和催化分解特性。
- 肼、硝酸肼和水三种组份的含量必须控制在一定的范围，才能使其冰点、能量指标、安全性能和催化分解特性均符合使用要求。
- 典型的单组元混肼推进剂有：
 - ◆ 单推-2（DT-2： $61\% \text{N}_2\text{H}_4 + 31\% \text{N}_2\text{H}_5\text{NO}_3 + 8\% \text{H}_2\text{O}$ ）
 - ◆ 单推-3（DT-3： $67\% \text{N}_2\text{H}_4 + 24\% \text{N}_2\text{H}_5\text{NO}_3 + 9\% \text{H}_2\text{O}$ ）

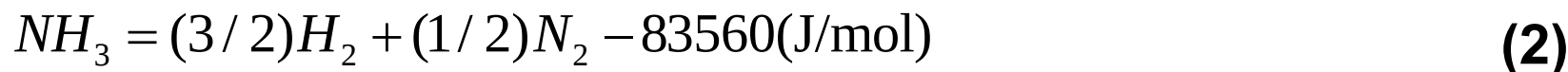
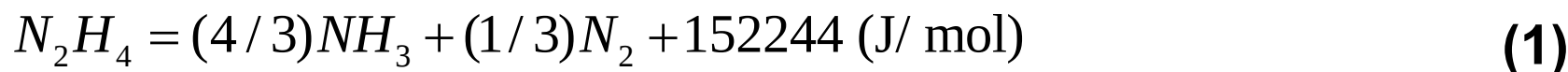
表 4 DT-2 和 DT-3 主要物性指标

项目	单位	数值	
		DT-2	DT-3
分子量	/	37.404	36.846
冰点	℃	-40	-30
密度(20℃)	g/cm ³	1.139	1.112
饱和蒸汽压(20℃)	kPa	1.32	2.67
粘度(20℃)	mPa·s	2.689	2.24
表面张力(20℃)	N/m	0.07763	0.0718
临界温度	℃	346.06	347.44
临界压强	MPa	13.30	13.4
真空比冲	m/s	2274	2343

6.4. 肼分解

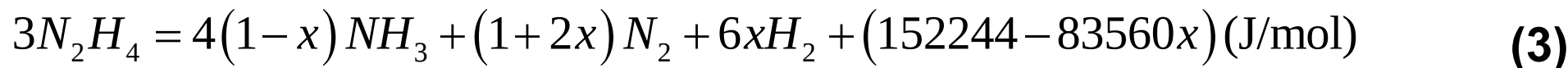
肼 (N_2H_4) 在单组元推力室内, 通过高活性的铈/三氧化二铝自发性催化剂, 肼可以发生催化分解:

- 发生肼分解成氨 (NH_3) 和氮 (N_2) 的放热反应
 - 发生氨离解成氮和氢的吸热反应
 - 氨在反应过程中并不完全解离, 其解离度的百分数称为氨解离度
- 肼分解包括两种反应:



第二种反应是不完全的。

通过限制催化剂床长, 可以把氨解离度控制在某个范围内:



其中, x 为氨解离度。

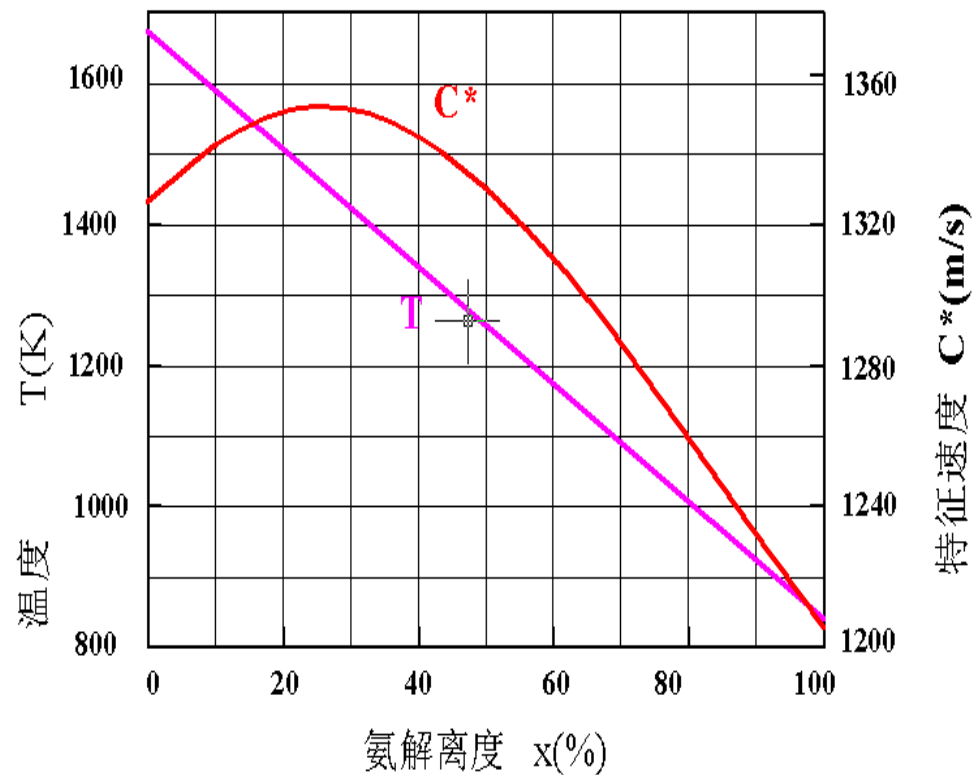
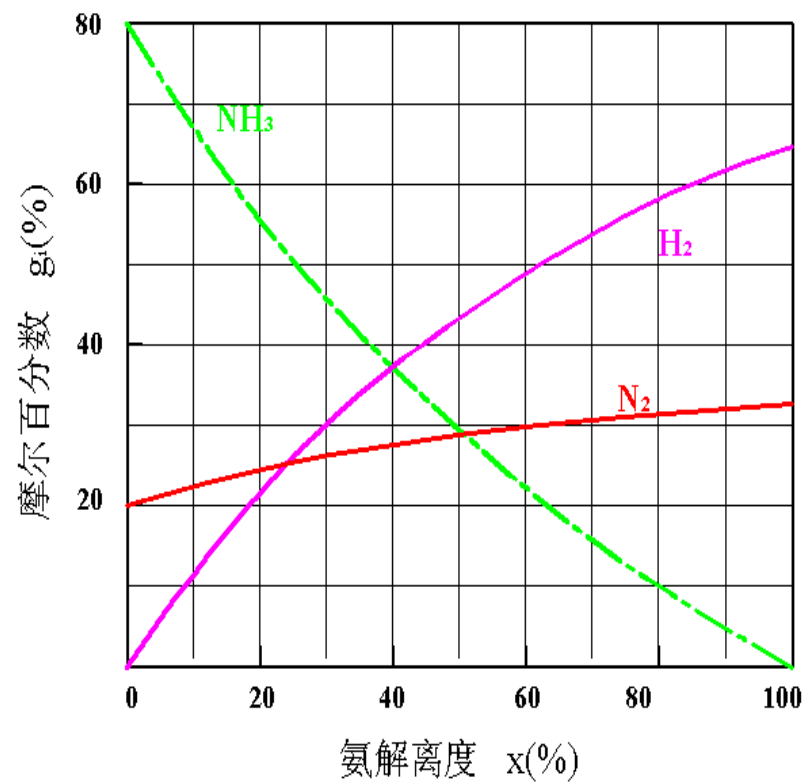


图 8 反应产物质量百分数与解离度的关系 图 9 温度与气体常数与解离度的关系

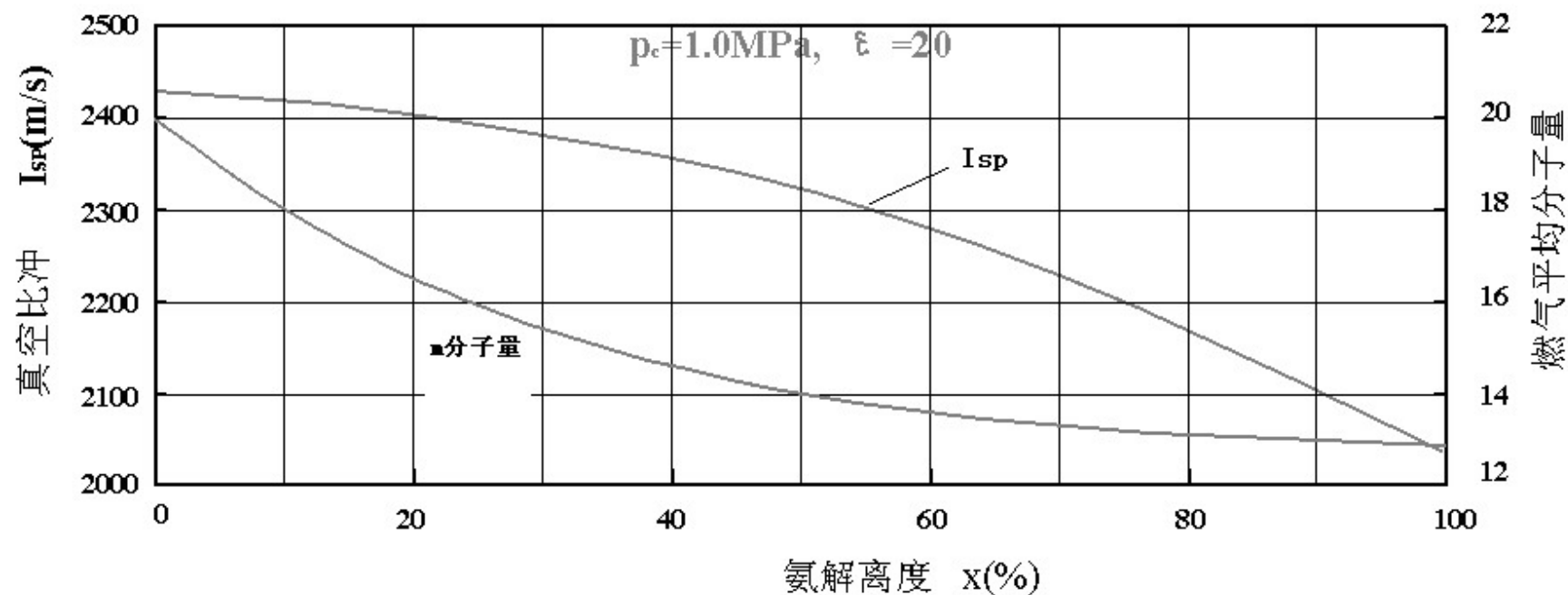


图 10 真空比冲与解离度的关系

分解反应产物的温度:

$$T \approx m(1650 - 780x) \quad (4)$$

其中, T 为分解反应产物温度; m 为肼的质量百分比浓度。

随着氨解离度的增加, 反应产物温度和真空比冲减小, 而气体常数增加。

6.5. 催化剂床设计

催化剂床的参数设计对单组元肼分解发动机的工作性能影响很大，其设计主要参数包括：床载荷、直径、长度、流阻、催化剂颗粒尺寸。

6.5.1. 床载荷和床直径

单位时间内从单位横截面积催化剂床所通过的推进剂质量流量称为床载荷。通常的床载荷选取范围为 $6\sim 60 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

根据发动机的推进剂质量流量以及所选定的床载荷，可以确定推力室圆柱段的内径尺寸，即催化剂床直径。床直径的计算公式为：

$$q_{mc} = A G_b = 0.25 \pi d_b^2 G_b = C_D P_c A_t \Rightarrow d_b = \sqrt{4 q_{mc} / (\pi G_b)} \quad (5)$$

其中， d_b 为床直径； q_{mc} 为推进剂质量流量； G_b 为床载荷。

6.5.2. 催化剂床长

在理想的绝热分解室中，一般将催化剂床分为三个区域来描述分解过程：

- 区域 1. 肼喷入催化剂床并蒸发，部分肼被分解，并提供蒸发所需部分热量；
- 区域 2. 剩余的肼继续分解；
- 区域 3. 一部分氨分解。

估算催化剂床的长度（经验公式）：

$$L_b = L_{bu} + \frac{0.06G_b^{0.554}}{p_c^{0.306} A_s^{0.3}} \quad (6)$$

其中

- L_b 为催化剂床长度；
- L_{bu} 为细颗粒催化剂前床的长度；
- G_b 为催化剂床载荷；
- P_c 为推力室平均压强，MPa；
- A_s 为粗颗粒催化剂床的比表面积， m^2/m^3 。

催化剂床的孔隙率:

$$\varepsilon = 1 - \rho_b / \rho_p \quad (7)$$

其中, ε 为催化剂床孔隙率; ρ_b 为催化剂床密度; ρ_p 为催化剂粒子密度。
通过催化剂床的孔隙率, 可以计算催化剂床的比表面积:

$$A_s = \frac{6(1 - \varepsilon)}{\phi_s d_p} \quad (8)$$

其中, A_s 为粗颗粒催化剂床的比表面积; d_p 为催化剂颗粒直径; ϕ_s 为催化剂颗粒的球形系数。

催化剂颗粒的球形系数取决于颗粒的形状和尺寸。

对于一定粒子大小和形状、催化剂床的比表面积与催化剂床直径的关系如图。

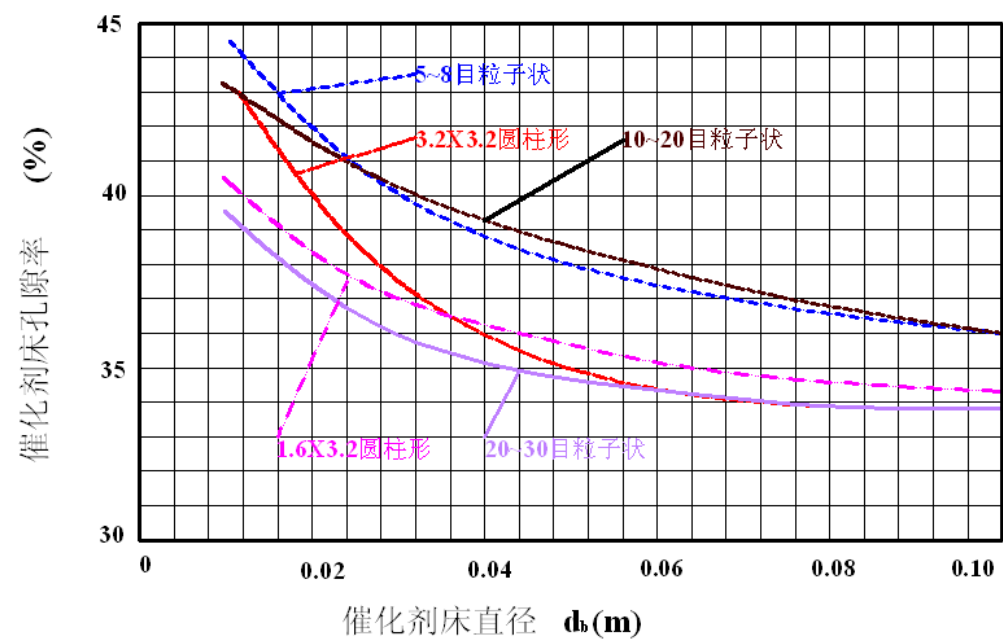


图 11 催化剂床孔隙率与床直径的关系

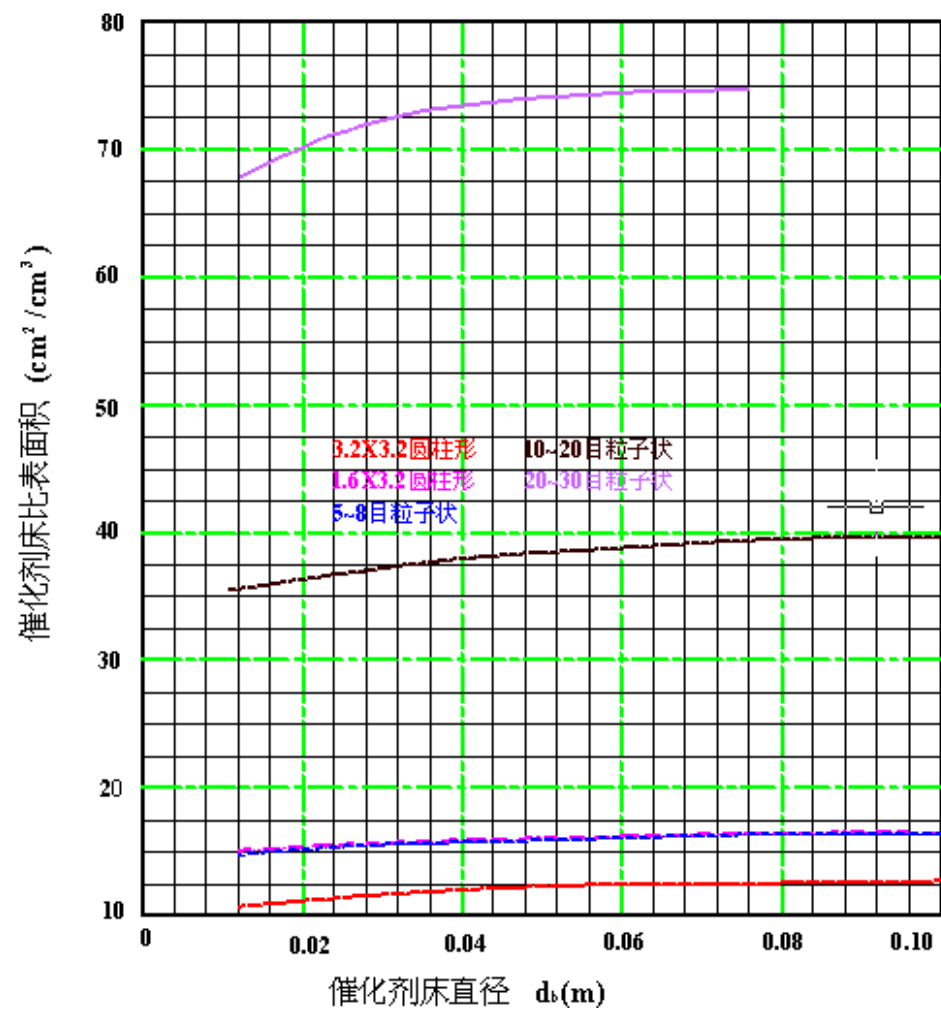


图 12 催化剂床比表面积与床直径的关系

6.5.3. 催化剂床结构

催化剂床通常装填两种不同规格的催化剂

- 前床（靠近喷注器）选用 20~30 目的细颗粒催化剂；
- 后床选用 14~18 目的粗颗粒催化剂；
- 这种粗、细颗粒催化剂通常为高活性的铈/三氧化二铝；
- 催化剂前、后床用金属网或多孔板隔开，以防止相互混杂而影响性能；
- 用支撑板固定催化剂，以防止松动而形成空穴；
- 催化剂床的结构形式分为轴向和径向两类。

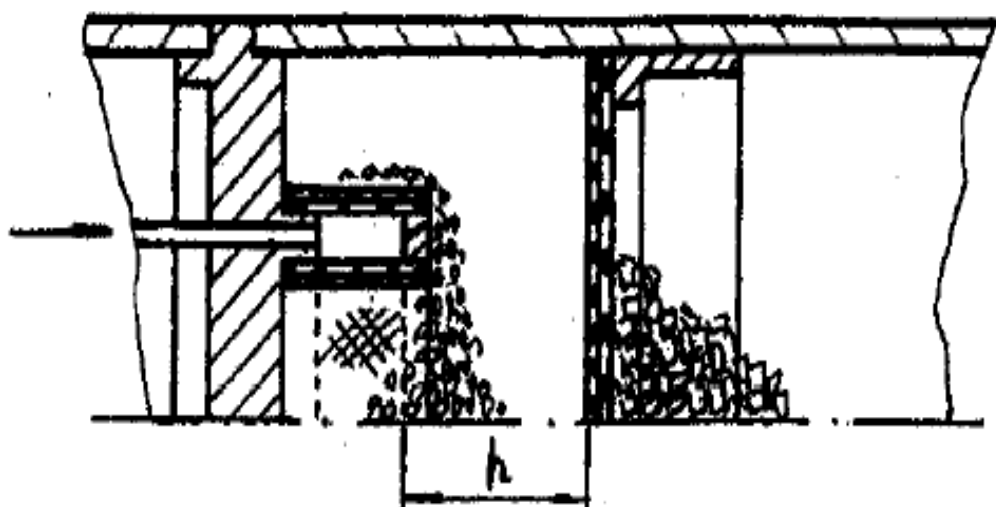


图 13 穿入式催化剂床结构图

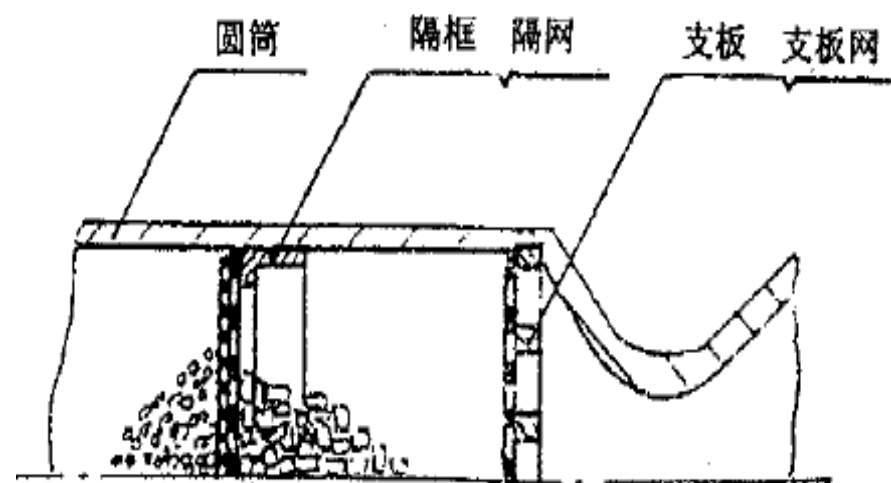


图 14 典型催化剂床结构

6.5.4. 催化剂床压降

肼及其分解产物流过催化剂床时引起的压强损失，即催化剂床压降。

流体沿均匀截面流动的压强损失 Δp 可用无因次的 Fanning 方程表示：

$$\Delta p = 2 f G_b^2 L / (D_e \rho) \quad (9)$$

Δp 为压强损失； L 为长度； D_e 为直径； f 为无因次摩擦系数； G_b 为床载荷； ρ 为推进剂密度。

对任意排列的催化剂床，Oman 和 Waston 给出下列压强损失计算方程：

$$\Delta p = (2 f_d G_b^2 A_s L) / (\rho \varepsilon^{1.7}) \quad (11)$$

f_d 为摩擦系数，当 $10 < Re < 150$ 时， $f_d = 2.6 / Re^{0.3}$ ，当 $150 < Re < 300$ 时， $f_d = 1.23 / Re^{0.15}$

对于单组元肼分解发动机，雷诺数的上限为 3000。

Grant 给出了催化剂床压降的计算公式：

$$\text{当 } 100 < Re_b < 600 \text{ 时：} \quad \Delta p = 2.157 \times 10^{-7} G_b^{1.8} A_s L / (p_c \varepsilon^{1.7}) \quad (12)$$

$$\text{当 } 600 < Re_b < 3000 \text{ 时：} \quad \Delta p = 3.752 \times 10^{-7} G_b^2 A_s L / (p_c \varepsilon^{1.7}) \quad (13)$$

其中， Δp 为催化剂床压降； P_c 为平均室压； ε 为催化剂床孔隙率； L 为床长； G_b 为催化剂床载荷； A_s 为粗颗粒催化剂床的比表面积。

6.6. 喷注器设计

6.6.1. 设计准则

喷注器设计对推力室的响应特性、性能、工作稳定性以及催化剂寿命均有显著影响。因此喷注器设计应遵循以下准则：

- 选择适当的喷注器压降，防止低频室压脉动的发生；
- 合理选择喷注孔数目和排列方式，使肼能均匀地与催化剂接触，改善启动的工作平稳性；
- 喷注器外圈圆周与室壁的距离等于孔距，以免流量集中在室壁附近；
- 喷注孔覆盖的面积尽可能与催化剂床面积相等；
- 尽量减小喷注器集液腔的容积，使后效冲量减小，并改善脉冲工作性能；
- 从结构上保证喷注器集液腔和推进剂阀的温度控制，使其在规定的温度范围内，确保发动机工作的可靠性；
- 喷注器结构简单，制造方便。

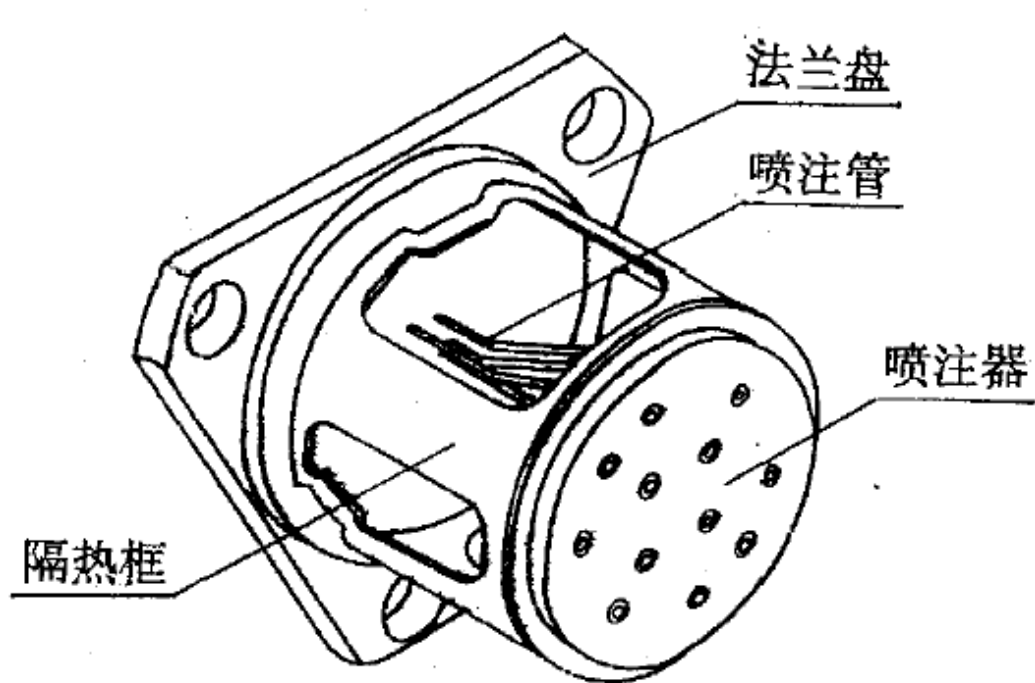


图 15 莲蓬式喷注器示意图

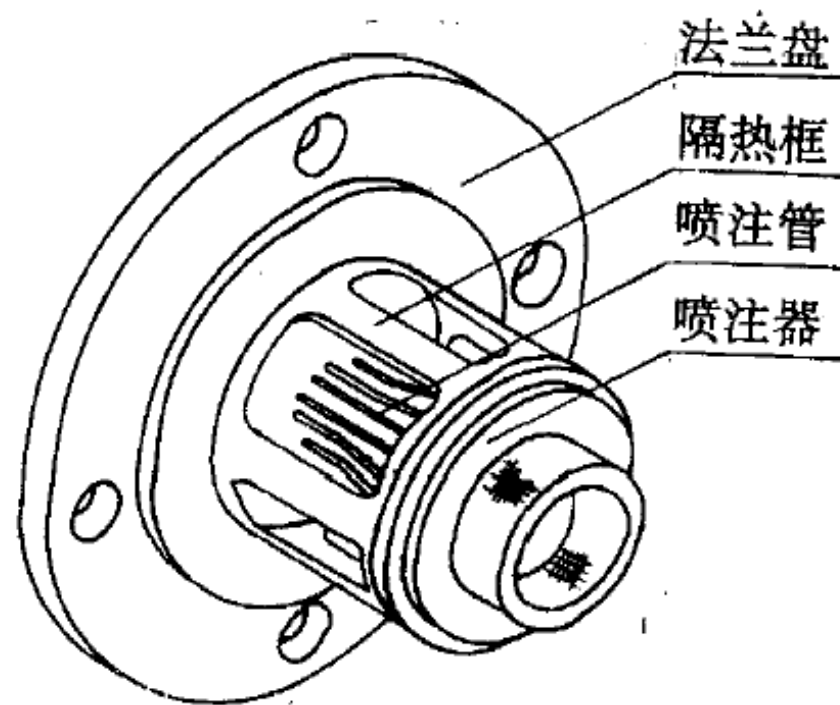


图 16 穿入式喷注器示意图

衡量喷注器性能的参数包括：

- 发动机响应时间（点火滞后时间 t_{80} 与后效时间 t_{10} ）、室压粗糙度、特征速度、比冲、推力系数。
- 点火滞后时间：从推进剂进入分解室到稳态压强达到额定室压 80% 的时间
- 后效时间：室压下降到额定室压 10% 的时间
- 室压粗糙度：催化剂床下游压强的峰-峰值变化。

6.6.2. 喷注器压降与室压选择

通常采用挤压式推进剂供应系统

推力室压强一般为 $0.1 \sim 1.0 \text{MPa}$

喷注器的压降应满足以下规定要求：

$$(\Delta p_t - \Delta p_b) / p_c > 0.5 \quad (14)$$

Δp_t 为推进系统中推进剂总压降； Δp_b 为催化剂床压降； p_c 为平均室压。

在恒压式推进剂供应系统中，设计应考虑上述喷注器压降要求；

落压式供应系统（降压比最大到 6），需要通过热试鉴定其稳定性。

6.6.3. 喷注器结构形式

单组元肼分解发动机喷注器的形式主要包括：

- 莲蓬式、发汗式、毛细管式、穿入式、空腔分散式、单元式。

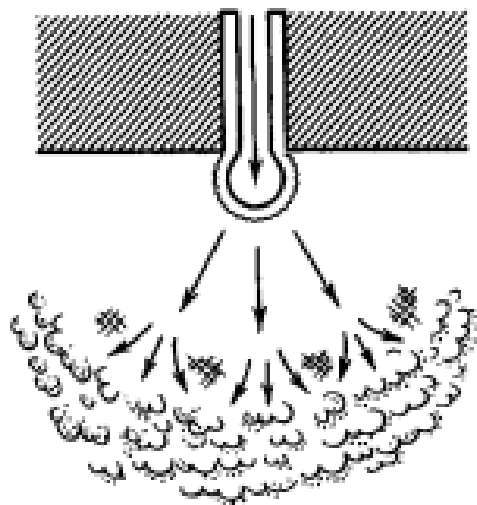


图 17 莲蓬式喷注器

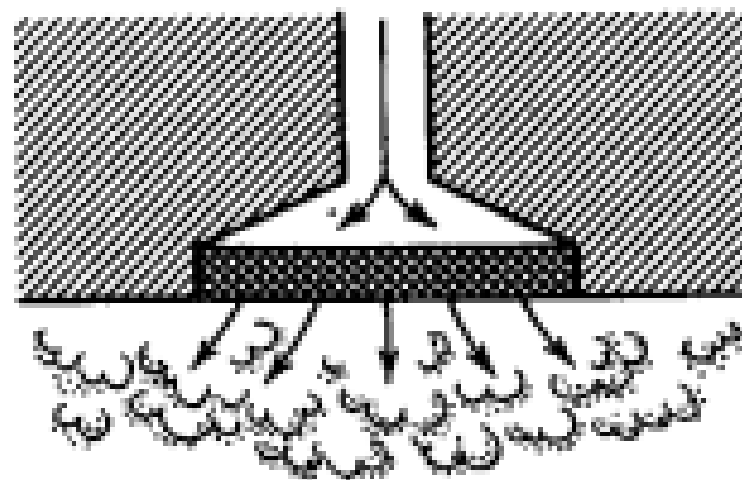


图 18 发汗式喷注器

莲蓬式喷注器进气管轴线与推力室轴线平行，喷注器进口处装有节流孔板，用来调节进口压强。

发汗式喷注器使用金属丝网烧结的发汗材料作为喷注器，其局部床载荷远小于莲蓬式喷注器的局部床载荷，并且在外部振动情况下能防止催化剂粉末或粒子进入喷注器和进口管路。

6.7. 喷管设计

特点：推力较小、室压较低、流速较低、温度较低、喉部雷诺数较低

- 喷管面积比在一般 40~100 范围内
- 将喷管收敛角适当选得大一些，通常为 120°左右
- 辐射冷却

喉部截面积随壁温的变化由下式确定：

$$A_t' = A_t (1 + 2\alpha \Delta T) \quad (18)$$

其中

A_t' 为工作时喉部截面面积；

A_t 为常温下喉部截面面积；

α 为喷管壁平均膨胀系数，1/°C；

ΔT 为平均温升。

6.8. 过氧化氢(H₂O₂)单组元发动机

V2 广泛使用

过氧化氢在催化剂的作用下可分解为氧气和水，并释放热量。

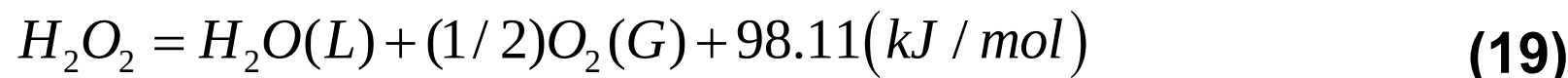
密度高，使得其密度比冲高于肼的密度比冲（高 6%）。

无毒，分解产物对环境无害，使得其研制、使用和维护成本大大降低。

6.8.1. 工作原理

通过自发或催化分解产生高温燃气，并通过喷管喷出产生推力。

H₂O₂ 分解按照下式进行：



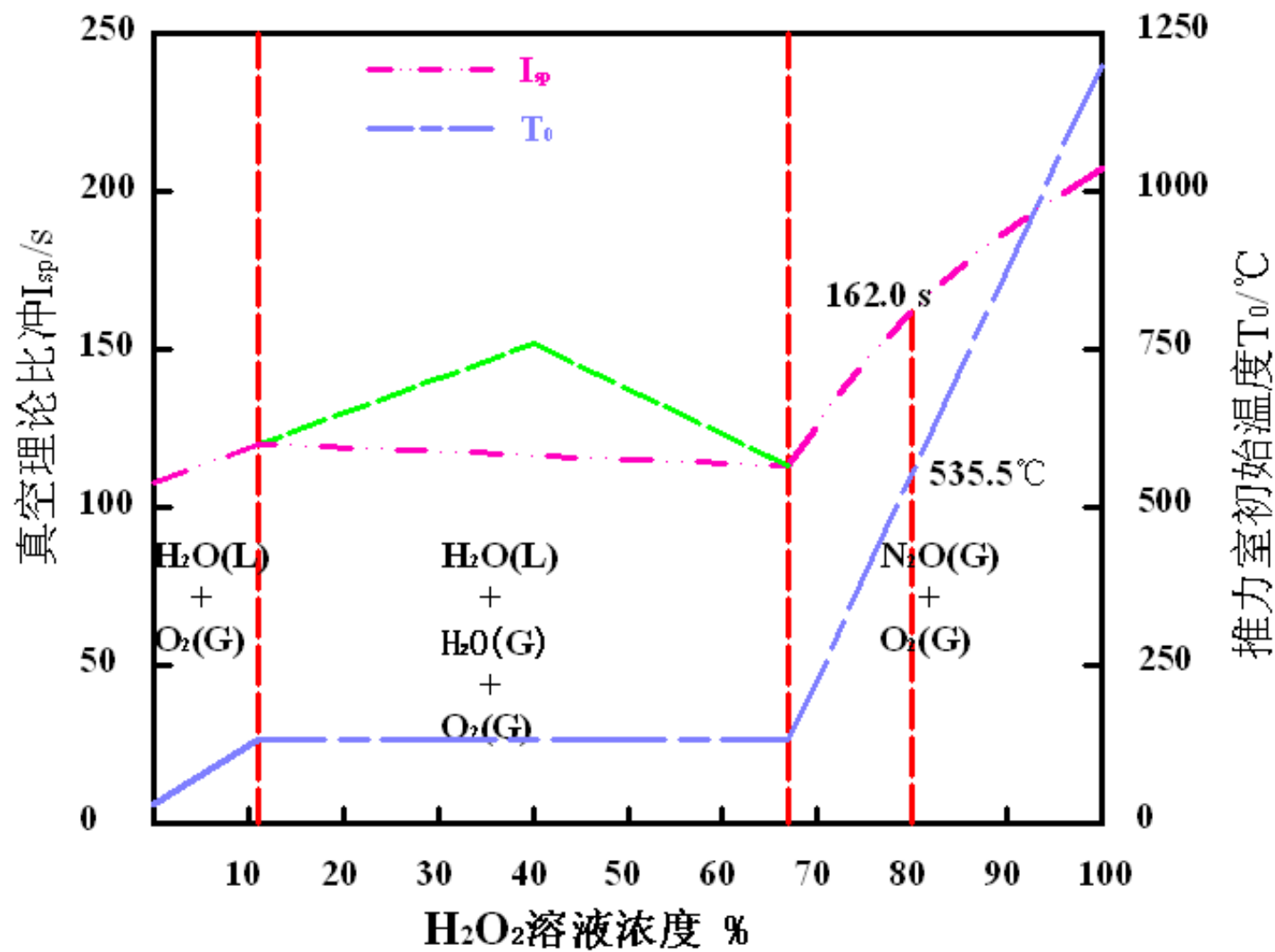


图 19 不同浓度 H_2O_2 与推力室初始温度及真空理想比冲的关系

6.8.2. 催化剂形式

过氧化氢催化剂包括：

- 固态催化剂_采用镀有氧化钐的银网以及锰组或二氧化锰颗粒
- 液态催化剂_采用高锰酸盐饱和溶液。

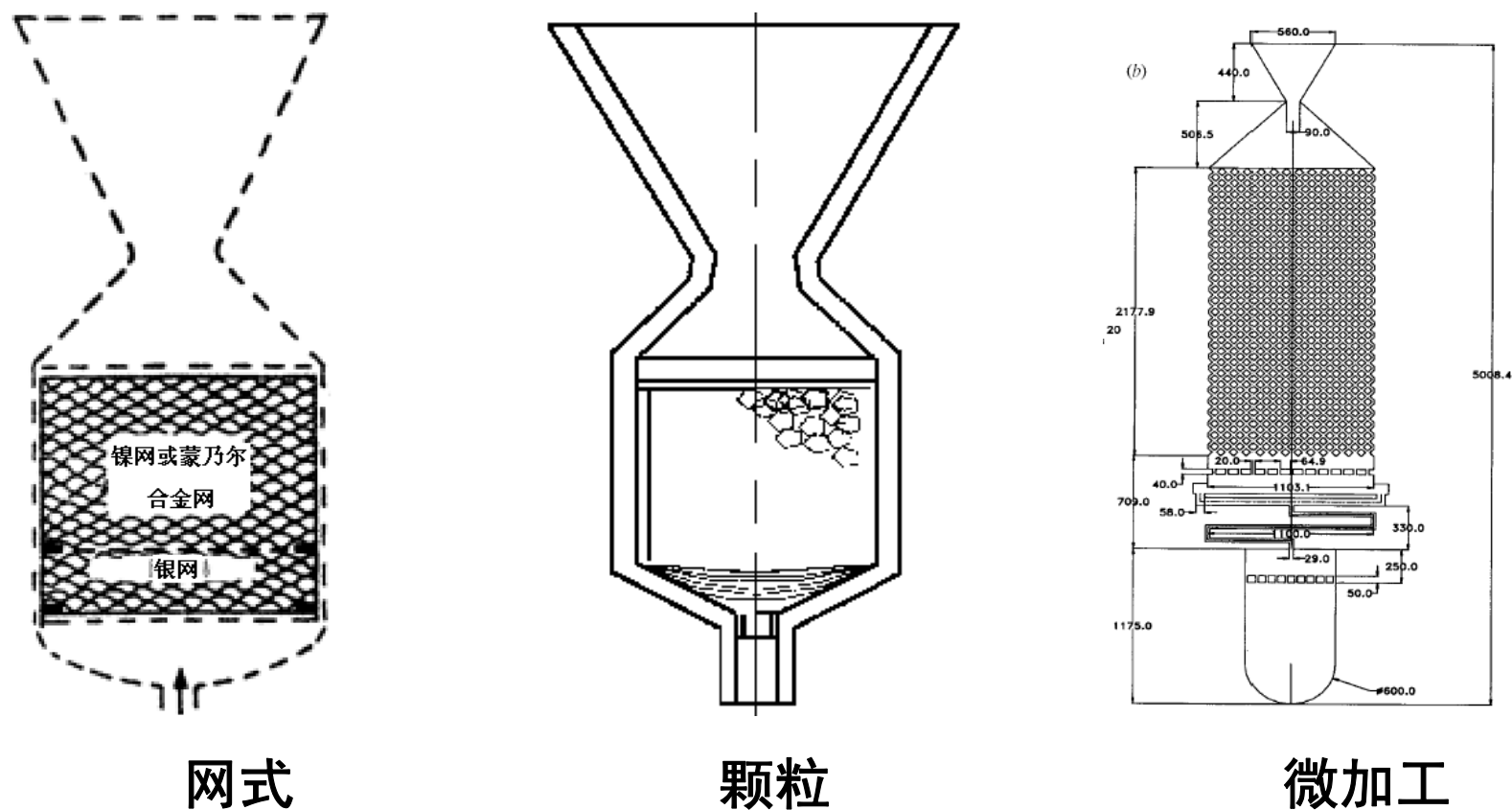
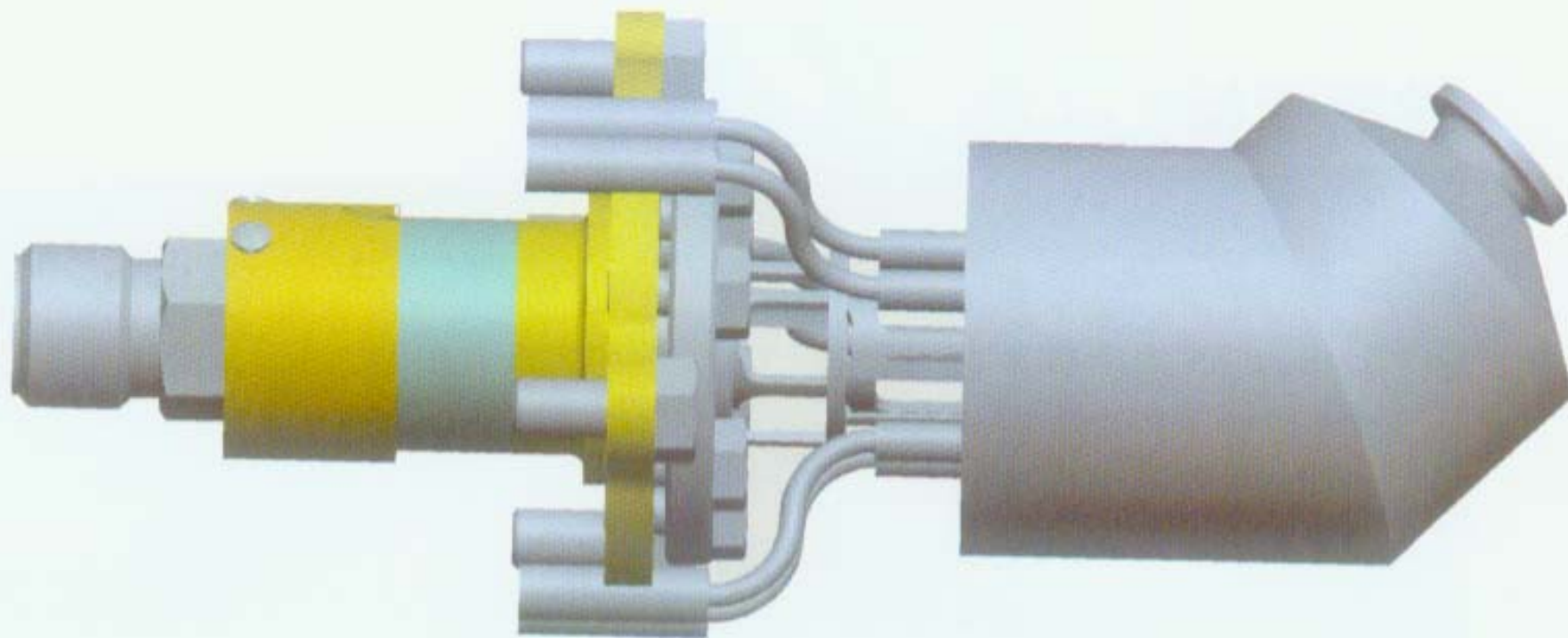


图 20 催化剂床结构形式



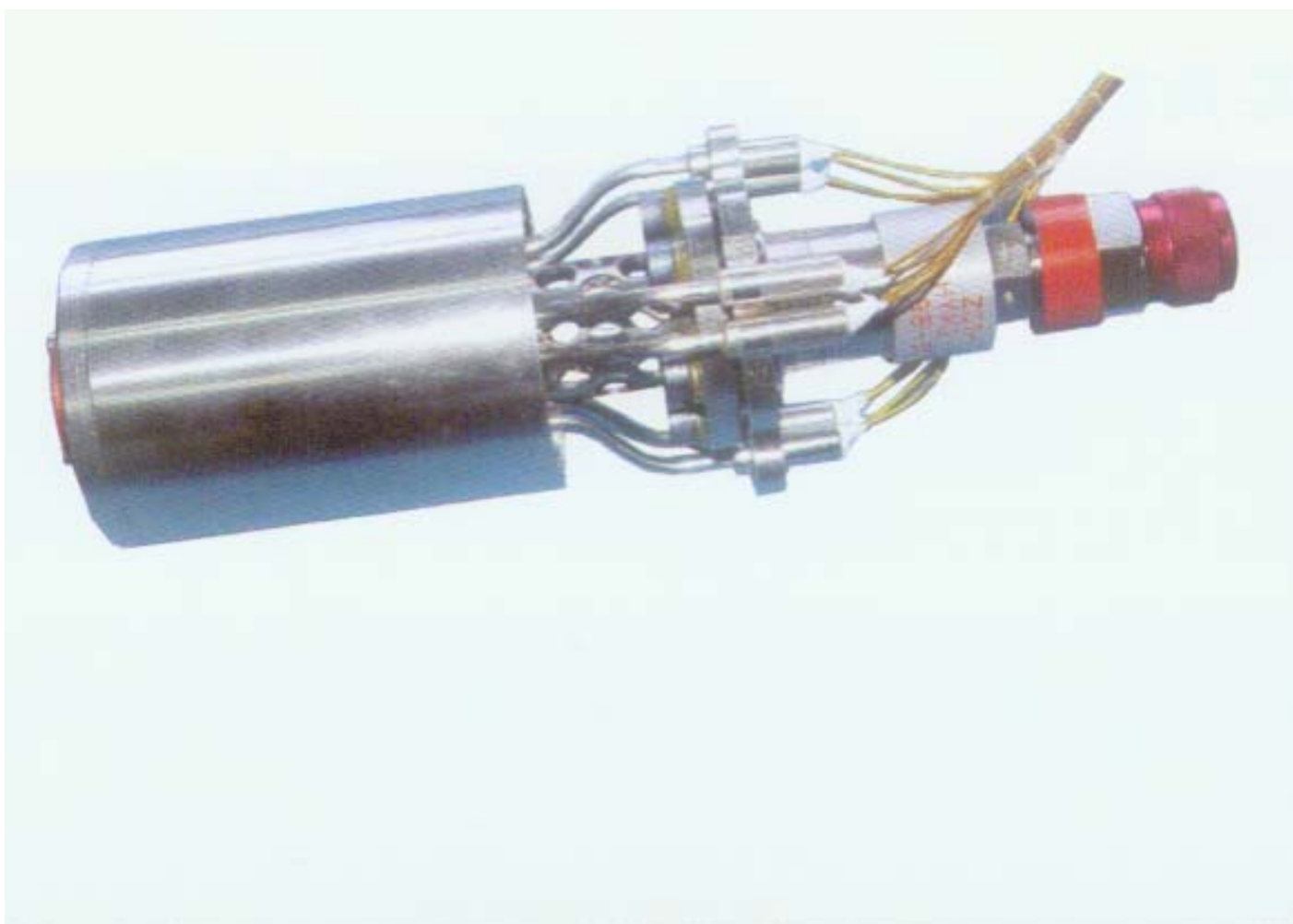
1N推力器组件

代号: GTHR-1N



1N45度推力器组件

代号: GTNR-1NA



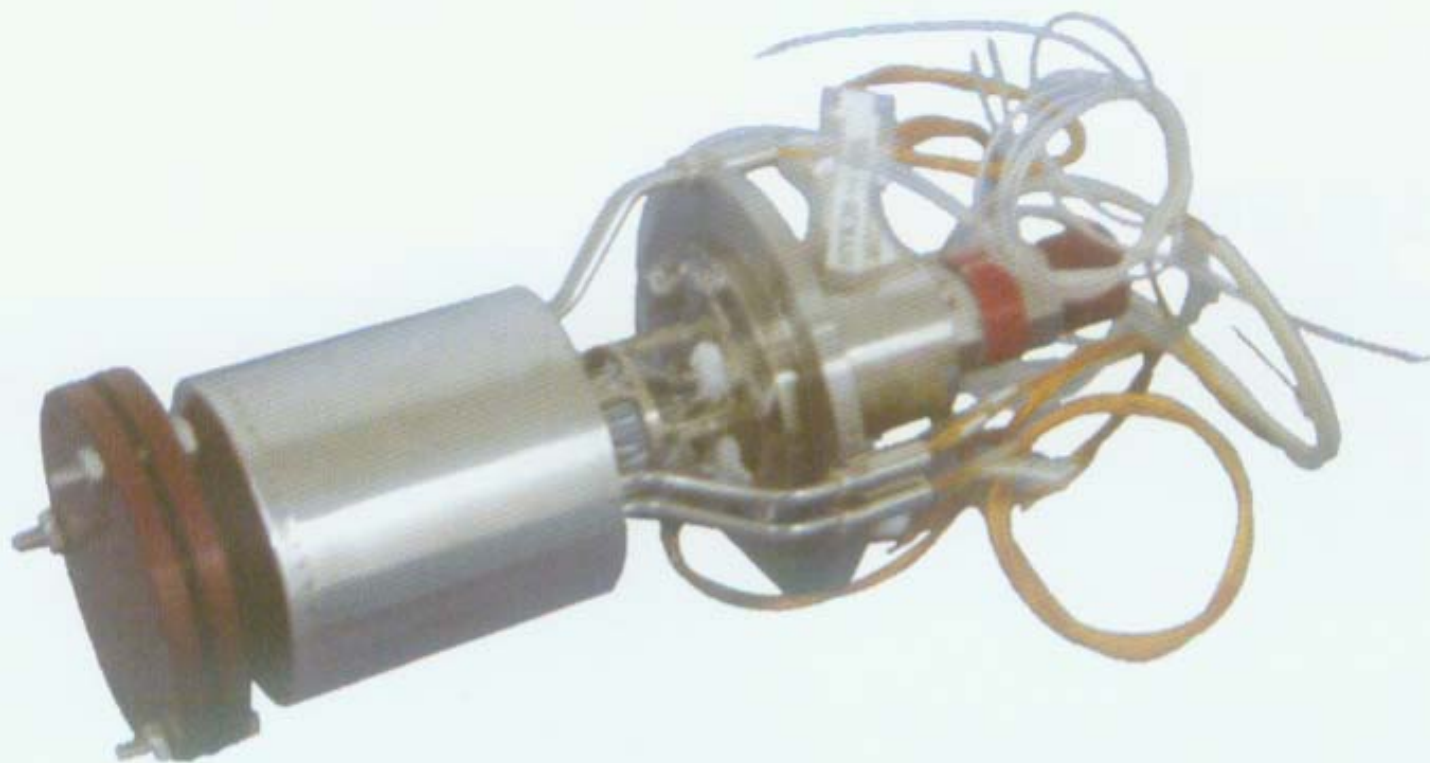
5N推力器组件

代号: GTHR-5N



5N推力器组件A

代号: GTHR-5NA



20N推力器组件

代号：GTNR-20N



Vacuum Thrust	1N
Specific Impulse	2,230 N·s/kg
Nozzle Area Ratio	79
Accumulated Burn Time	50,000 s
Pulse Capability	250,000
Mass	0.26 kg



Vacuum Thrust	5N
Specific Impulse	2,200 N·s/kg
Nozzle Area Ratio	38
Accumulated Burn Time	50,000 s
Pulse Capability	200,000
Mass	0.41 kg



Vacuum Thrust	10N
Specific Impulse	2,200 N·s/kg
Nozzle Area Ratio	23
Accumulated Burn Time	20,000 s
Pulse Capability	10,000
Mass	0.28 kg



Vacuum Thrust	100N
Specific Impulse	2,200 N·s/kg
Nozzle Area Ratio	17
Accumulated Burn Time	20,000 s
Pulse Capability	10,000
Mass	0.57 kg



Vacuum Thrust	150N
Specific Impulse	2,200 N·s/kg
Nozzle Area Ratio	23
Accumulated Burn Time	20,000 s
Pulse Capability	10,000
Mass	1.30 kg



Vacuum Thrust	200N
Specific Impulse	2,200 N·s/kg
Nozzle Area Ratio	15
Accumulated Burn Time	10,000 s
Pulse Capability	5,000
Mass	1.70 kg



Vacuum Thrust	20N
Specific Impulse	2,230 N-s/kg
Nozzle Area Ratio	89
Accumulated Burn Time	50,000 s
Pulse Capability	50,000
Mass	0.68 kg



Vacuum Thrust	40N
Specific Impulse	2,200 N-s/kg
Nozzle Area Ratio	16
Accumulated Burn Time	20,000 s
Pulse Capability	10,000
Mass	0.53 kg



Vacuum Thrust	60N
Specific Impulse	2,200 N-s/kg
Nozzle Area Ratio	17
Accumulated Burn Time	20,000 s
Pulse Capability	10,000
Mass	0.61 kg



Vacuum Thrust	300N
Specific Impulse	2,200 N-s/kg
Nozzle Area Ratio	24
Accumulated Burn Time	10,000 s
Pulse Capability	5,000
Mass	1.96 kg



Vacuum Thrust	600N
Specific Impulse	2,200 N-s/kg
Nozzle Area Ratio	16
Accumulated Burn Time	500 s
Pulse Capability	300
Mass	2.30 kg

习题

设计一个单组元推进剂详细清单满足要求:

- 1) 在平均比冲为 **225s** 时, 平移机动 $\Delta V=200\text{m/s}$ 。
- 2) 航天器干重为 **600kg**。
- 3) 脉冲模式下在平均比冲为 **130s** 时, 姿态控制总冲量为 **80000Ns**。
- 4) 备用推进剂为 **35%**的可用推进剂。

● 雷诺数

雷诺数（Reynolds number）一种可用来表征流体流动情况的无量纲数。 $Re=pvd/\mu$ ，其中 v 、 ρ 、 μ 分别为流体的流速、密度与黏性系数， d 为一特征长度。例如流体流过圆形管道，则 d 为管道的当量直径。利用雷诺数可区分流体的流动是层流或湍流，也可用来确定物体在流体中流动所受到的阻力。

中文名	雷诺数
外文名	Reynolds number
属 性	无量纲数
符 号	Re
计算公式	$Re=pvd/\mu$

雷诺数基本释义

雷诺数是流体力学中表征粘性影响的相似准则数。为纪念 O.雷诺而命名，记作 Re 。

雷诺数，又称雷诺准数，是用以判别粘性流体流动状态的一个无因次数群。^[1]

1883 年英国人雷诺(O.Reynolds)观察了流体在圆管内的流动，首先指出，流体的流动形态除了与流速(ω)有关外，还与管径(d)、流体的粘度(μ)、流体的密度(ρ)这 3 个因素有关。

$Re=pvL/\mu$ ， ρ 、 μ 为流体密度和运动粘性系数， v 、 L 为流场的特征速度和特征长度。雷诺数物理上表示惯性力和粘性力量级的比。对外流问题， v 、 L 一般取远前方来流速度和物体主要尺寸(如机翼弦长或圆球直径)；内流问题则取通道内平均流速和通道直径。两个几何相似流场的雷诺数相等，则对应微团的惯性力与粘性力之比相等。

雷诺数较小时，粘滞力对流场的影响大于惯性力，流场中流速的扰动会因粘滞力而衰减，流体流动稳定，为层流；反之，若雷诺数较大时，惯性力对流场的影响大于粘滞力，流体流动较不稳定，流速的微小变化容易发展、增强，形成紊乱、不规则的紊流流场。

雷诺数相关研究

雷诺数越小意味着粘性力影响越显著，越大意味着惯性力影响越显著。雷诺数很小的流动，例如雾珠的降落或润滑膜内的流动过程，其特点是，粘性效应在整个流场中都是重要的。雷诺数很大的流动，例如飞机近地面飞行时相对于飞机的气流，其特点是流体粘性对物体绕流的影响只在物体

边界层和物体后面的尾流内才是重要的。在惯性力和粘性力起重要作用的流动中，欲使二几何相似的流动(几何相似比 $n=L_p/L_m$ ，下标 p 代表实物， m 代表模型)满足动力相似条件，必须保证模型和实物的雷诺数相等。例如，在同一种流体(即 ν 相等)中进行模拟实验，则动力相似条件为 $\nu_m=n\nu_p$ ，即模型缩小 n 倍，速度就要增大 n 倍。

物体在不可压缩粘性流体中作定常平面运动时，所有的无量纲数由两个参数确定：攻角 α 和雷诺数 Re 。为了实现动力相似，除了要求模型和实物几何相似外，还必须保证攻角和雷诺数相等。第一个条件总是容易实现的，而第二个条件一般很难完全满足。特别是，当被绕流物体尺度比较大时，模型比实物小很多倍，就需要很大地改变流体绕流速度，密度和粘度。这在实际中是很困难的，因为在低速风洞中，风速的提高总是有一定限度的。所以相似律不能严格满足，只能近似实现。当然，这样做对空气动力学特性会有影响，例如，最大举力系数要降低，最小阻力系数会升高等。但是，只要实物的雷诺数 Re_p 和模型的雷诺数 Re_m 相差不太大，就可以利用某些经验方法加以修正，使实验结果在实践中仍能得到应用。当然最好的办法是建造巨大的、可在其中对真实飞机吹风的风洞，或建造压缩空气(密度较大)在其中作用的循环式闭口风洞，以便达到加大模型试验雷诺数的目的。

根据分子运动理论，动力粘性系数 $\mu \propto \rho \bar{v} l$ ，其中 $\bar{v}$ 为分子平均速度， l 为分子平均自由程。由于 $\bar{v}$ 和声速 c 是同一量级，可得到： $Re=kMa/Kn$ ，式中 Ma 为马赫数； Kn 为克努曾数； k 为常数；它表明雷诺数、马赫数、克努曾数之间有着内在的联系。当流动速度很小时， Ma 很小， Kn 也很小，由于粘性效应是主要的，这两个无量纲参数以组合形式 Ma/Kn 出现，即以雷诺数出现。当流动速度很高时，从量纲理论可知，雷诺数和马赫数都起着重要作用。如果空气稀薄，则克努曾数起着主要作用。

粘性流体的求解不仅和边界条件有关，而且也和雷诺数有关。若雷诺数很小，则粘性力是主要因素，压力项主要和粘性力项平衡；若雷诺数很大，粘性力项成为次要因素，压力项主要和惯性力项平衡。因此，在不同的雷诺数范围内，流体流动不同，物体所受阻力也不同。当雷诺数低时，阻力正比于速度、粘度和特征长度；而雷诺数高时，阻力大体上正比于速度平方、密度和特征长度平方。

雷诺数也是判别流动特性的依据，例如在管流中，雷诺数小于 2300 的流动是层流， $Re=2300 \sim 4000$ 为过渡状态，雷诺数大于 4 000 时的是湍流。

雷诺数典型雷诺数

普通[航空](#)飞机：5 000 000

小型[无人机](#)：400 000

[海鸥](#)：100 000

滑翔[蝴蝶](#)：7000

圆形光滑管道：2500

[橡胶](#)管道：1600~2100

[大脑](#)中的[血液](#)流：100

[主动脉](#)中的血流 1000

●目

目是指每英寸长度上孔数量，50目就是指每平方英寸上的孔眼是50x50个，500目就是500x500个，目数越高，孔眼越多。[1]除了表示筛网的孔眼外，它同时用于表示能够通过筛网的粒子的粒径，目数越高，粒径越小。我国使用的是美国标准，美国泰勒标准筛的筛目尺寸对照表.可在下面网页看到详细资料。

- 1. 目是指每英寸长度上孔数量，50目就是指每平方英寸上的孔眼是50x50个，500目就是500x500个，目数越高，孔眼越多。除了表示筛网的孔眼外，它同时用于表示能够通过筛网的粒子的粒径，目数越高，粒径越小。
- 2. 粉体颗粒大小称颗粒粒度。由于颗粒形状很复杂，通常有筛分粒度、沉降粒度、等效体积粒度、等效表面积粒度等几种表示方法。筛分粒度就是颗粒可以通过筛网的筛孔尺寸，以1英寸（25.4mm）宽度的筛网内的筛孔数表示，因而称之为“目数”。在国内外尚未有统一的粉体粒度技术标准，各个企业都有自己的粒度指标定义和表示方法。在不同国家、不同行业的筛网规格有不同的标准，因此“目”的含义也难以统一。

国际上比较常用等效体积颗粒的计算直径来表示粒径。以 μm 或 mm 表示。

目数	粒度 um	目数	粒度 um	目数	粒度 um
5	3900	140	104	1600	10
10	2000	170	89	1800	8
16	1190	200	74	2000	6.5
20	840	230	61	2500	5.5
25	710	270	53	3000	5
30	590	325	44	3500	4.5
35	500	400	38	4000	3.4
40	420	460	30	5000	2.7
45	350	540	26	6000	2.5
50	297	650	21	7000	1.25

60	250	800	19		
80	178	900	15		
100	150	1100	13		
120	124	1300	11		

下表为我国通常使用的筛网目数与粒径（μm）对照表。

目数	微米	目数	微米	目数	微米	目数	微米
2.5	7925	12	1397	60	245	325	47
3	5880	14	1165	65	220	425	33
4	4599	16	991	80	198	500	25
5	3962	20	833	100	165	625	20
6	3327	24	701	110	150	800	15
7	2794	27	589	180	83	1250	10
8	2362	32	495	200	74	2500	5
9	1981	35	417	250	61	6250	2
10	1651	40	350	270	53	12500	1

过滤精度：一般通水网为 18-30 目/cm2，通气网为 40-100 目/cm2,通油网为 100-150 目/cm2