11. 电弧加热推力器（Arcjet）

11.1. 引言 2

11.2. 电弧加热推力器的主要工作原理 5

11.3. 电弧加热推力器的工作特性 12

11.3.1. 电弧工作模式分析 12

11.3.2. 电弧稳定工作对电源伏安特性的要求 13

11.3.3. 推力器工作过程能量分析 15

11.3.4. 电弧加热推力器工作性能指标 18

11.4. 电弧加热推力器的设计 19

11.4.1. 冷却方式 19

11.4.2. 结构设计 19

11.4.3. 推力器材料 21

11.1. 引言

电弧加热推力器

- 兼有电热式推力器和等离子体推力器的工作特性
- 通过阴极与阳极之间的直流放电产生的电弧加热推进剂
- 经加热后变为高温电离气体经喷管加速产生推力。

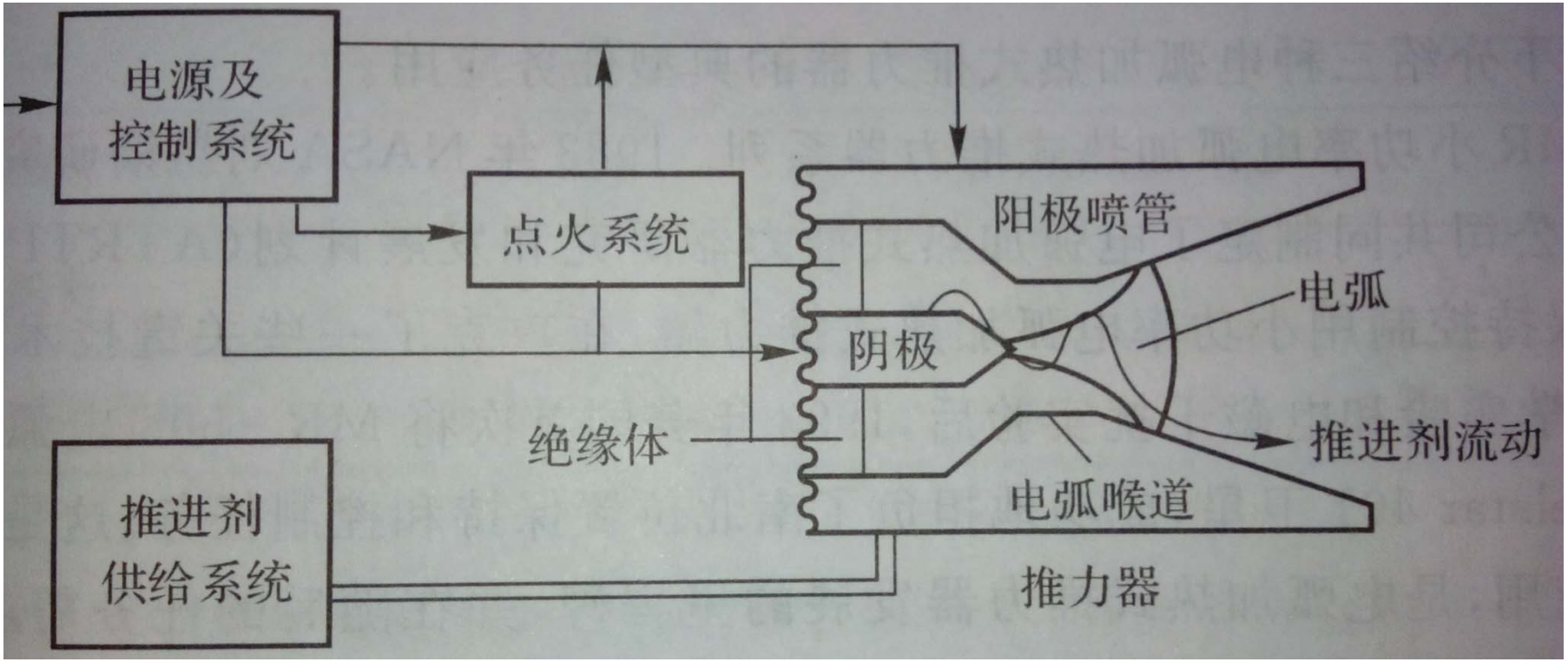


图 1 电弧加热推力器系统工作示意图

电弧加热推力器特点：

- 高推力密度
- 高推力/功率比
- 大的推进剂选择范围
- 推进剂与卫星液体推进系统兼容性好
- 结构简单紧凑便于安装
- 起动迅速
- 可靠性高
- 比冲较低、热损大、效率低、电流高、电极易烧蚀
- 寿命短（500-1500 h）

在 0.1～100kW 的功率范围内可以适应不同空间推进任务的要求：

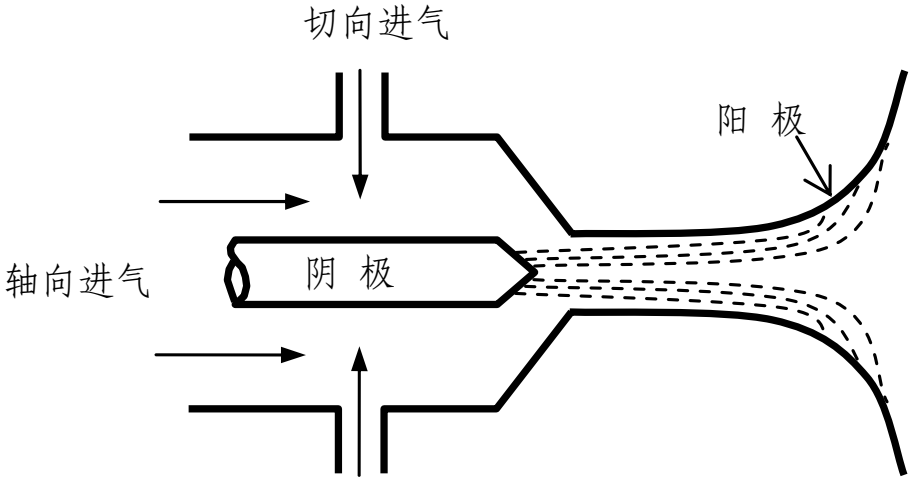
- 小功率（0.1～2kW）可以满足空间平台的姿态调整及高精度同步卫星位置保持、轨道机动及其它辅助推进的要求；
- 中功率（10～30kW）可担负空间平台和卫星的轨道提升、转移、维持等控制任务；
- 大功率（50～100kW）是未来星际航行主推进的重要工具。

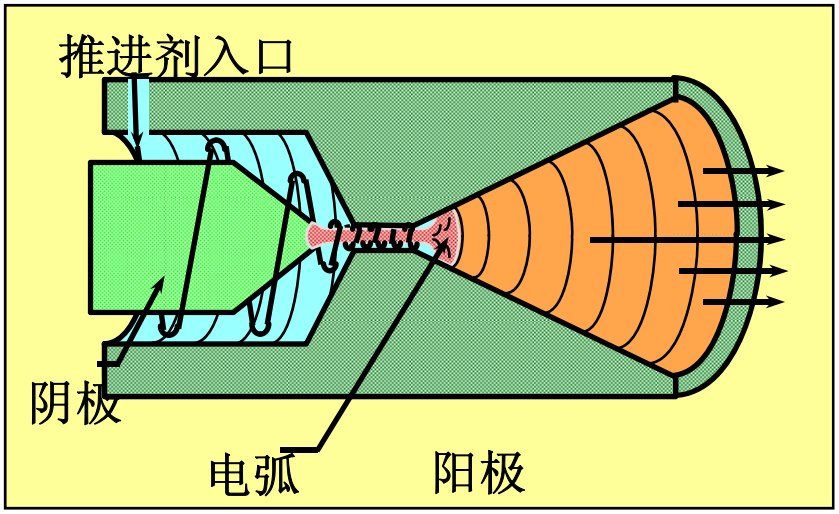
表 1 典型电弧加热推力器系统性能

	MR-510	ESEX	ATOS
PPU 输入功率	＜2.2kW	26.2kW±1.5%	850W
PPU 输入电压	68-71V	—	93 V
PPU 效率	93%	—	＞93%
推进剂流量	36-47mg/s	250mg/s	24mg/s
推力	222~258mN	1.93±0.09N	115 mN
比冲	5700-6000	7862±498	4800
总冲	1450000Ns	—	—
寿命	＞1950h	—	1010 h
推进效率	—	0.267±0.027	—
系统总重	22.1kg	—	5 kg
推进剂及贮存能力	肼 ＞250kg	氨	氨 26 kg

11.2. 电弧加热推力器的主要工作原理

- 电弧加热推力器是利用直流放电形成的高温电弧加热气态推进剂
- 经拉伐尔喷管加速喷出产生反作用推力
- 电弧加热推力器产生电弧喷射需要阳极、阴极和能让推进剂与电弧接触并顺利流出的通道这三个基本结构条件。
- 由于电弧加热推力器中的推进剂是流动的，电弧加热推力器内的电弧放电过程比静止气体介质中电极间的放电过程更加复杂【1】
- 电弧的形成：强电场发射——充满了电子和正离子，具有很大的电导——介质被击穿而产生电弧——碰撞游离。



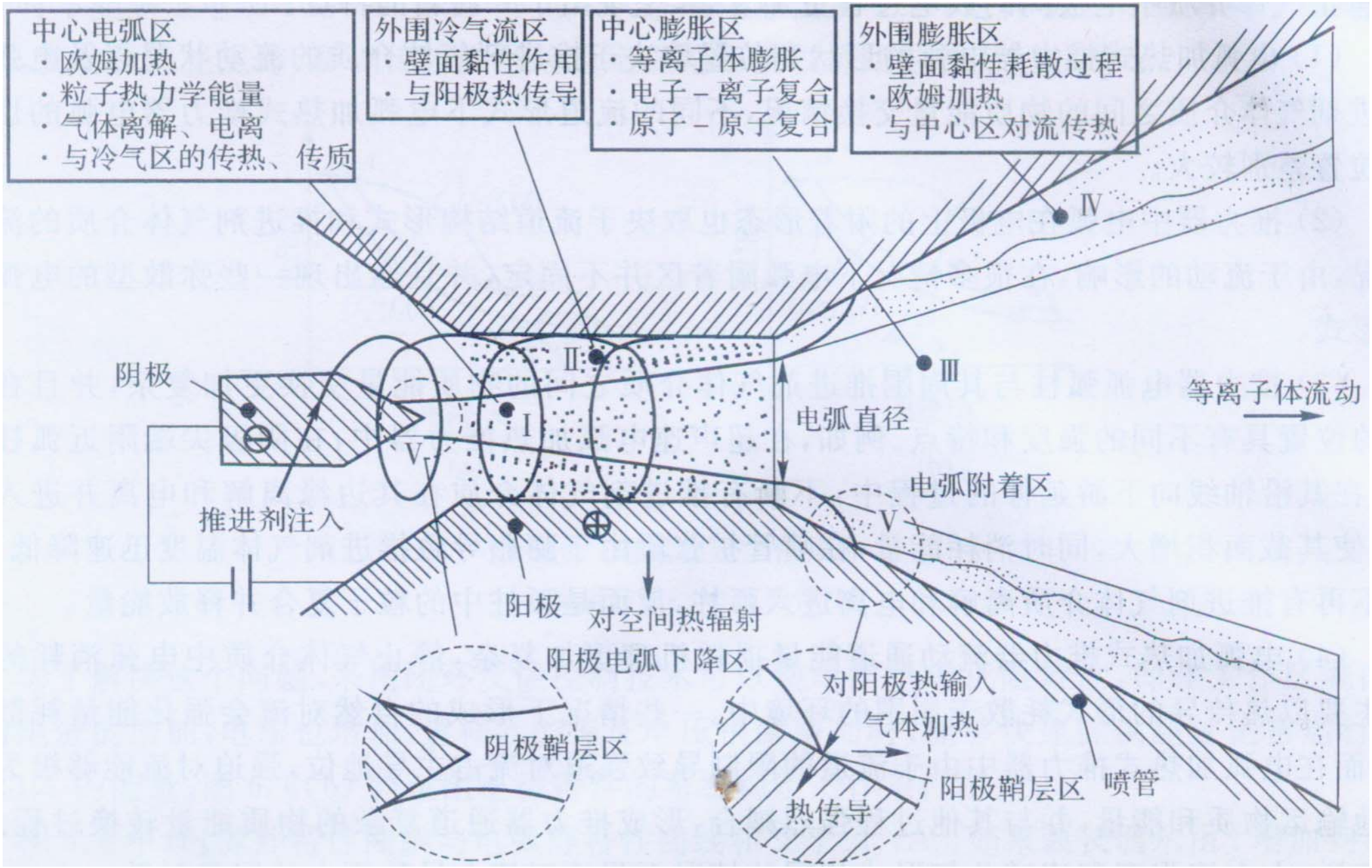


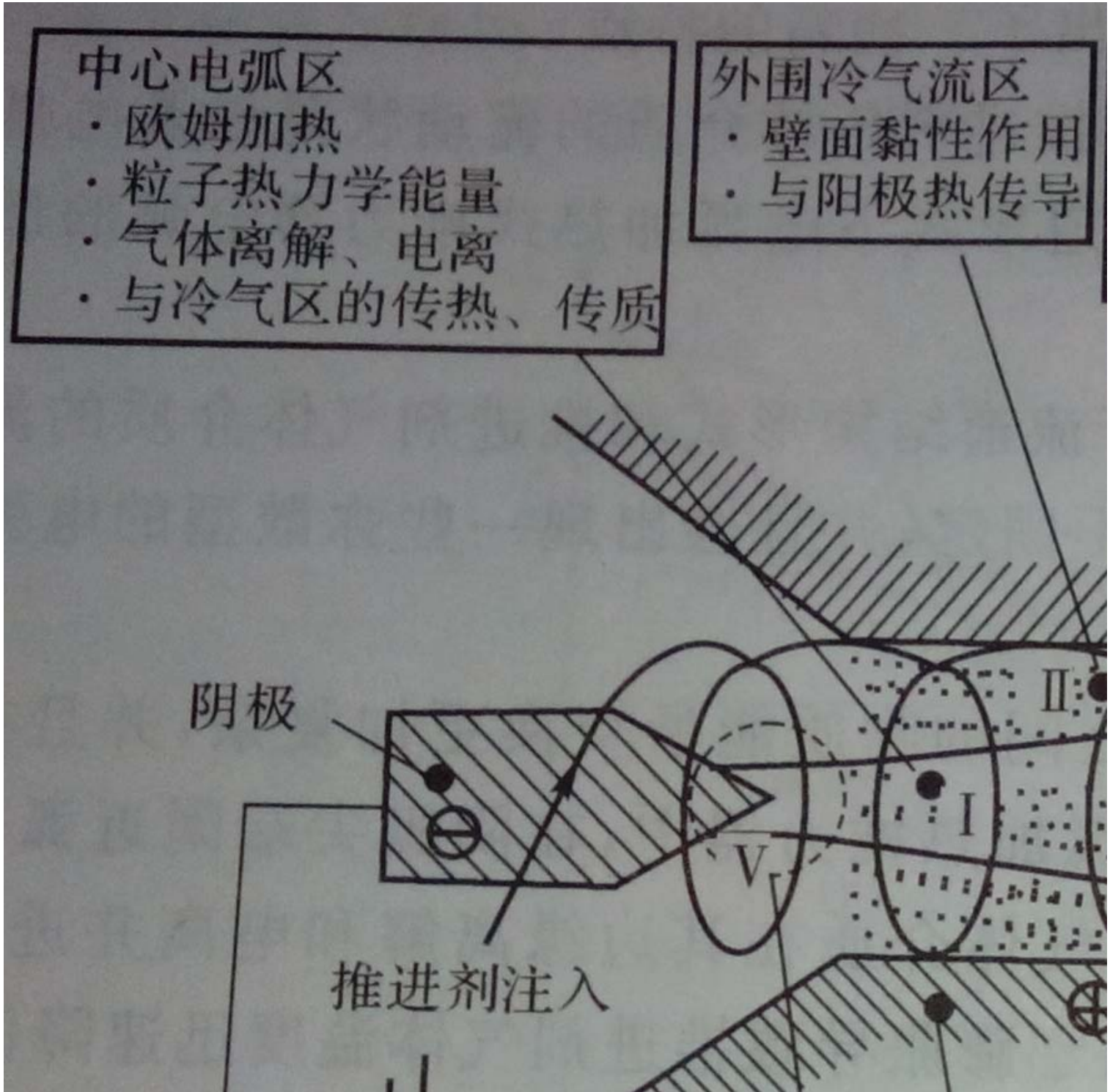
内部过程特点[2]:

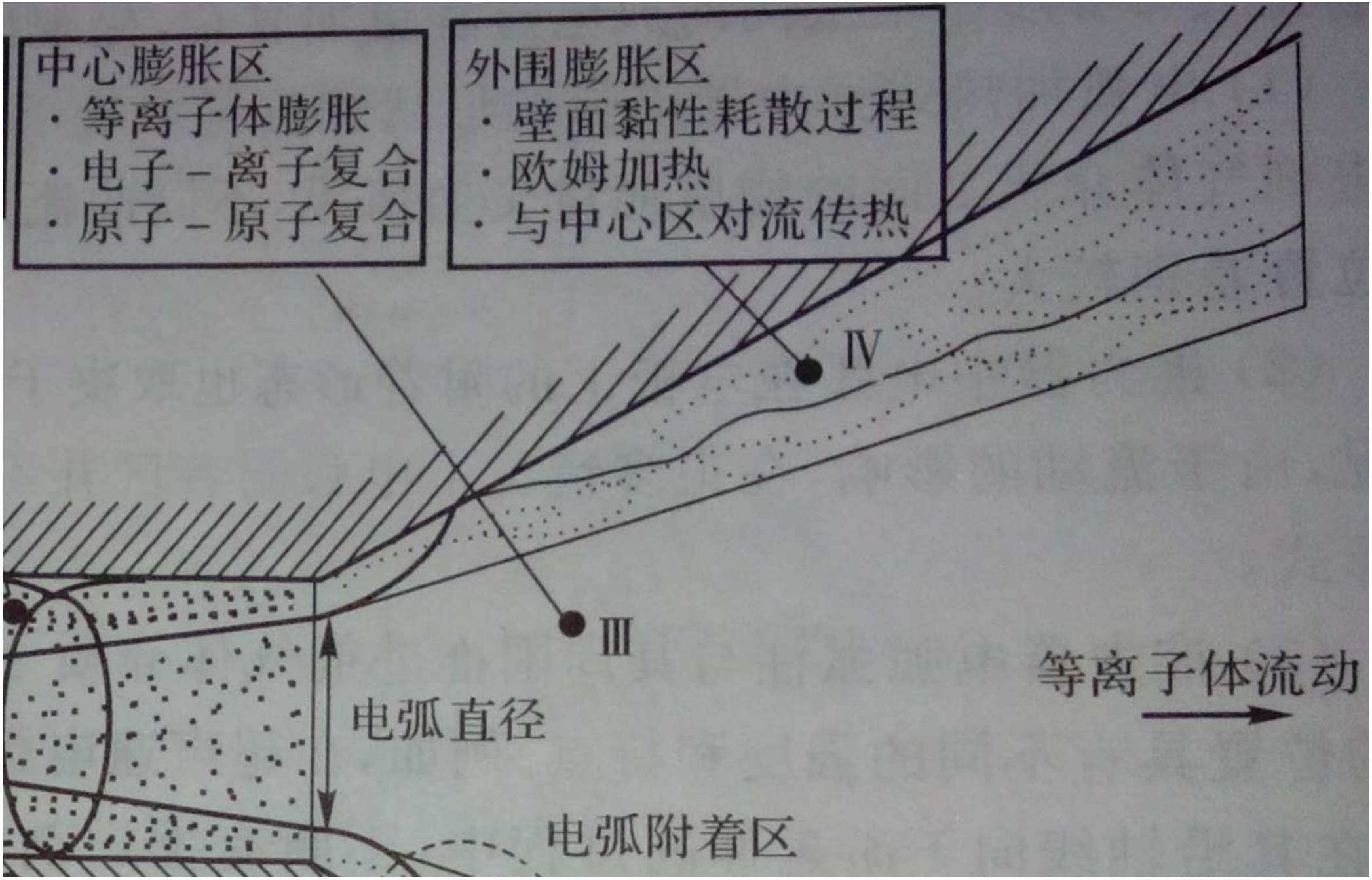
- 过程复杂多样并且各种过程强烈耦合。
- 空间狭小，使得各种物质和能量输运过程极其剧烈。
- 内部流动，尤其是喷管内流动明显偏离化学与热力学平衡，非平衡态。

根据其内部过程的特点将内部等离子体流动分为 5 个区域：

- 中心电弧区，即电弧室轴线附近的高温区域，欧姆加热、粒子碰撞
- 包裹中心弧柱区的外围冷气流区，对流
- 中心膨胀区，膨胀、离子-电子复合、原子-原子复合能量释放
- 外围膨胀区，膨胀区域
- 阳极鞘层区与阴极鞘层区。


中心电弧区
· 欧姆加热
· 粒子热力学能量
· 气体离解、电离
· 与冷气区的传热、传质
外围冷气流区
· 壁面黏性作用
· 与阳极热传导
中心膨胀区
· 等离子体膨胀
· 电子－离子复合
· 原子－原子复合
外围膨胀区
· 壁面黏性耗散过程
· 欧姆加热
· 与中心区对流传热
Ⅳ
Ⅲ
Ⅱ
Ⅰ
Ⅴ
Ⅴ
阴极
推进剂注入
电弧直径
等离子体流动
电弧附着区
阳极
对空间热辐射
阳极电弧下降区
阴极鞘层区
对阳极热输入
气体加热
热传导
阳极鞘层区
喷管


中心电弧区
· 欧姆加热
· 粒子热力学能量
· 气体离解、电离
· 与冷气区的传热、传质
外围冷气流区
· 壁面黏性作用
· 与阳极热传导
阴极
推进剂注入
Ⅱ
Ⅰ
V


中心膨胀区
· 等离子体膨胀
· 电子－离子复合
· 原子－原子复合
外围膨胀区
· 壁面黏性耗散过程
· 欧姆加热
· 与中心区对流传热
Ⅳ
Ⅲ
等离子体流动
电弧直径
电弧附着区

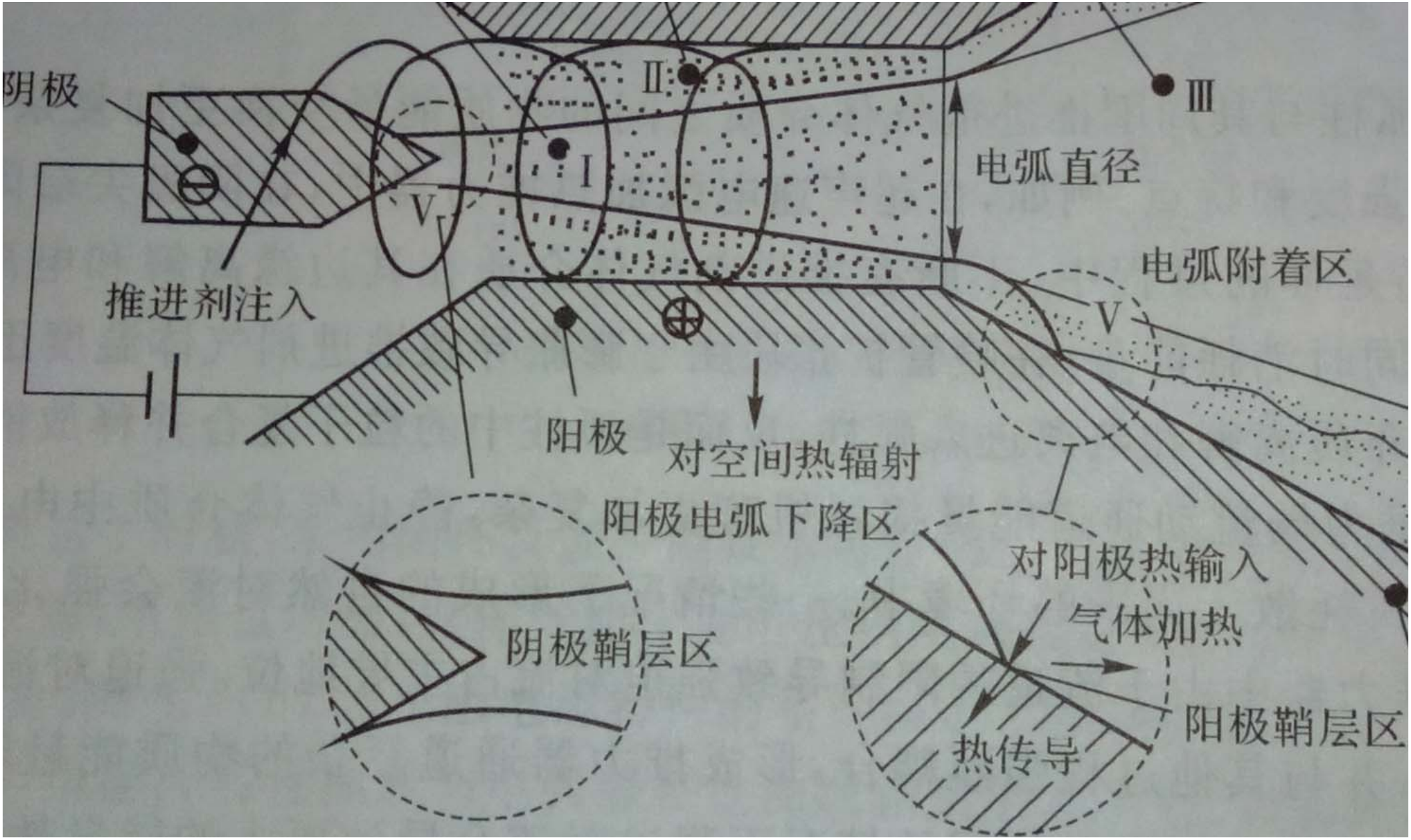
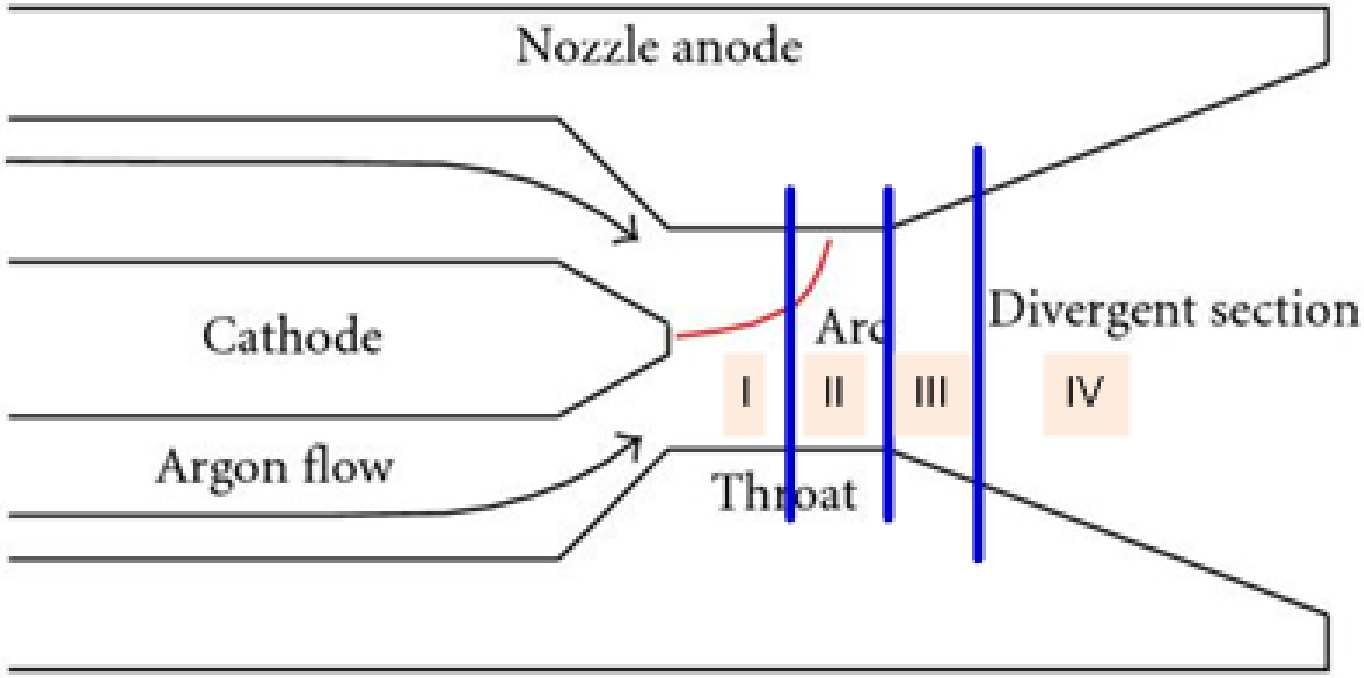


图 2 电弧加热推力器内部物理工作过程

从电能-化学能-内能-动能的能量转换过程可将内部流动分为四个区域

- 区域Ⅰ为阴极尖和靠近电弧室入口的部分，将电能转换成为化学能；
- 区域Ⅱ为电弧室的圆柱部分，欧姆加热是主要过程，视为热维持区，电能转换成为化学能。
- 区域Ⅲ为喷管扩张段靠近电弧室出口部分，电场强度降低，膨胀使等离子体的动能增加，电子与离子的复合占主导，化学能转换为内能的区域。
- 区域Ⅳ主要是热等离子体超声速膨胀，内能转换为气体的动能。

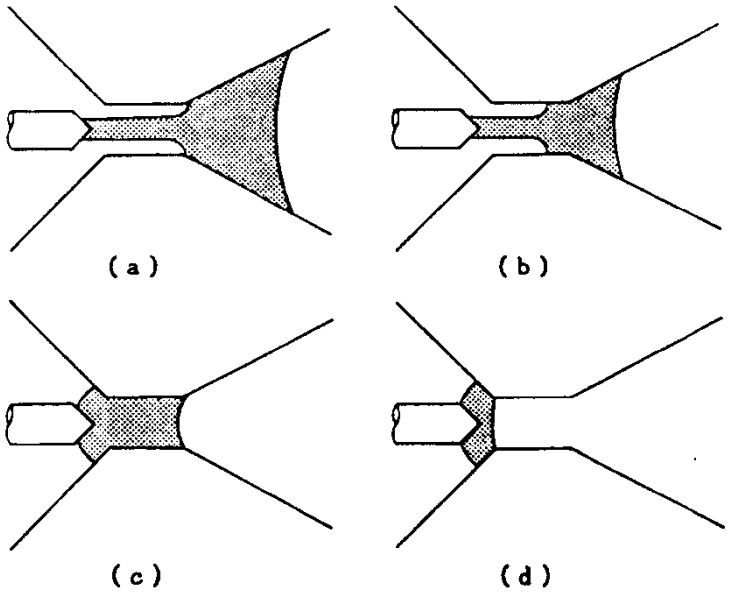


11.3. 电弧加热推力器的工作特性

11.3.1. 电弧工作模式分析

电弧工作模式分为高电压工作模式和低电压工作模式

- 根据实验测量电弧电压、电流和推进剂流量的结果表明，高、低电压模式主要取决于推进剂流量，即电弧喉道压强的高低。
- 电弧喉道压强低于一个临界压强值或推进剂流量低于一个临界流量值时，电弧在低电压模式下工作。
- 当推进剂质量流量适中并且高于临界流量值，电弧电流减小，弧柱直径变大，电弧附着点后移。
- 在更大的推进剂流量情况下，如果电流控制范围较小，电弧可能突然熄弧。



（a）、（b）高电压工作模式；（c）、（d）低电压工作模式

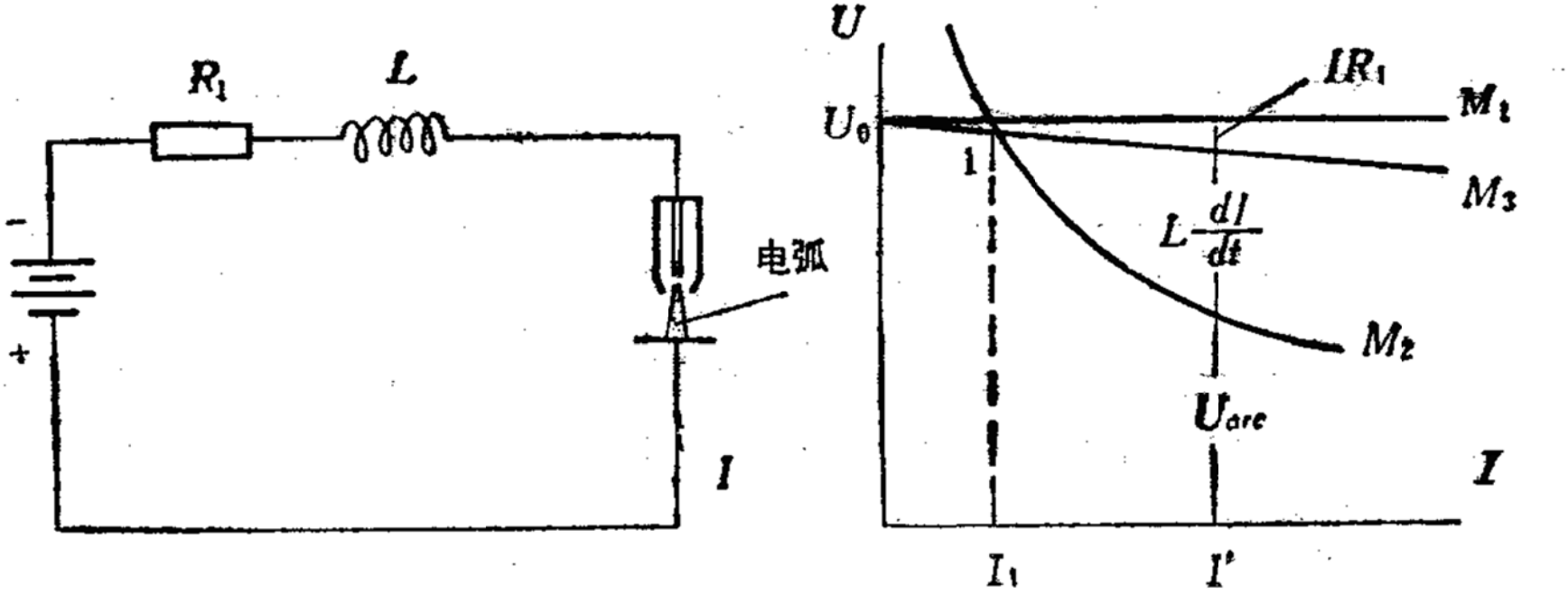
图 3 电弧工作模式

11.3.2. 电弧稳定工作对电源伏安特性的要求

电弧静特性：在一般情况下电弧具有下降的伏安特性，随着电弧电流的增加，电弧电压下降。

对系统电源工作特性要求：

- 输出外特性呈现正阻特性，在工作点附近，电压增加时电流也增加。
- 快速的动态响应特性，保证在弧长波动时能量快速输出，保证工作点稳定



$$L\dot{I} = U_0 - IR_1 - U_{arc}$$

稳定条件

$$|\tan(\alpha_p)|>|\tan(\alpha_0)|$$

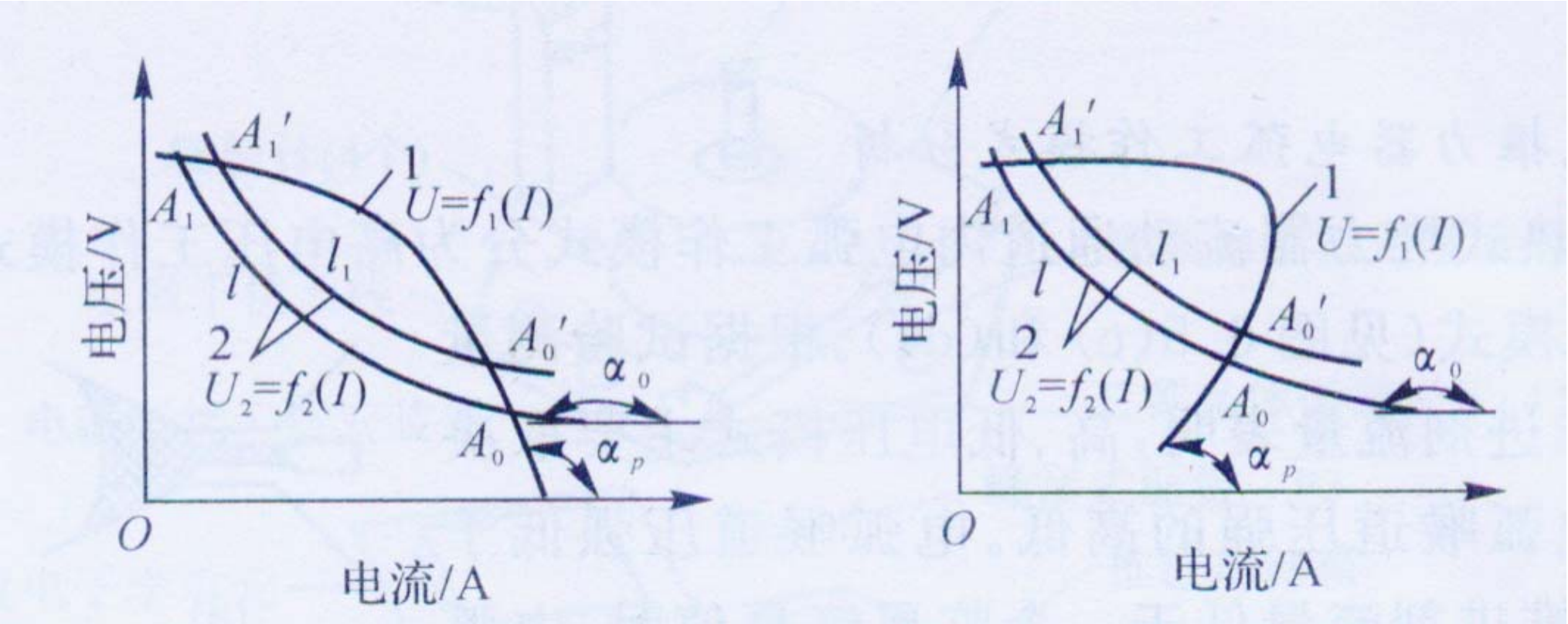


图 4 电弧稳定工作条件（负阻特性、正阻特性）

11.3.3. 推力器工作过程能量分析

电能损失

不是所有输入电能都用来提高推进剂比焓

有一部分电能以热损失的形式被电极材料所吸收，构成热损失

产生损失的几个主要机制是：

- 以热传导和辐射形式由主流区（即非电极鞘层区）导入电极壁面的热流；
- 阳极鞘层内的热流；
- 阴极鞘层内的热流。

三种损失占总电功率的ζ_{t1}、ζ_{t2}、ζ_{t3}，有用电功率所占总电功率的η_t，则有：

$$\eta_t = 1 - \zeta_{t1} - \zeta_{t2} - \zeta_{t3}$$

冻结损失

有用电功率中，有一部分能量冻结于各种热力学（平动、转动、振动及电子激发）和化学（离解、电离）能量模式中，构成冻结损失。

喷气动能的比率为η_f，热力学和化学能量模式中的能量比率ζ_{ft}、ζ_{fc}，则：

$$\eta_f = 1 - \zeta_{ft} - \zeta_{fc}$$

动能损失

轴向动能与产生推力有关，记这部分占总出口动能的分数为η_v。

总损失

根据能量损失机制，总能量转换效率（即推进效率）为：

$$\eta = \eta_t \cdot \eta_f \cdot \eta_v = (1-\zeta_{t1}-\zeta_{t2}-\zeta_{t3})\cdot(1-\zeta_{ft}-\zeta_{fc})\cdot\eta_v$$

喷管出口速度为：$u_e = \sqrt{2\eta_t\eta_f\eta_v h_1} = \sqrt{2\eta_t\eta_f\eta_v P/\dot{m}}$

式中，P 为输入总电功率

$\dot{m}$ 为推进剂的质量流率。

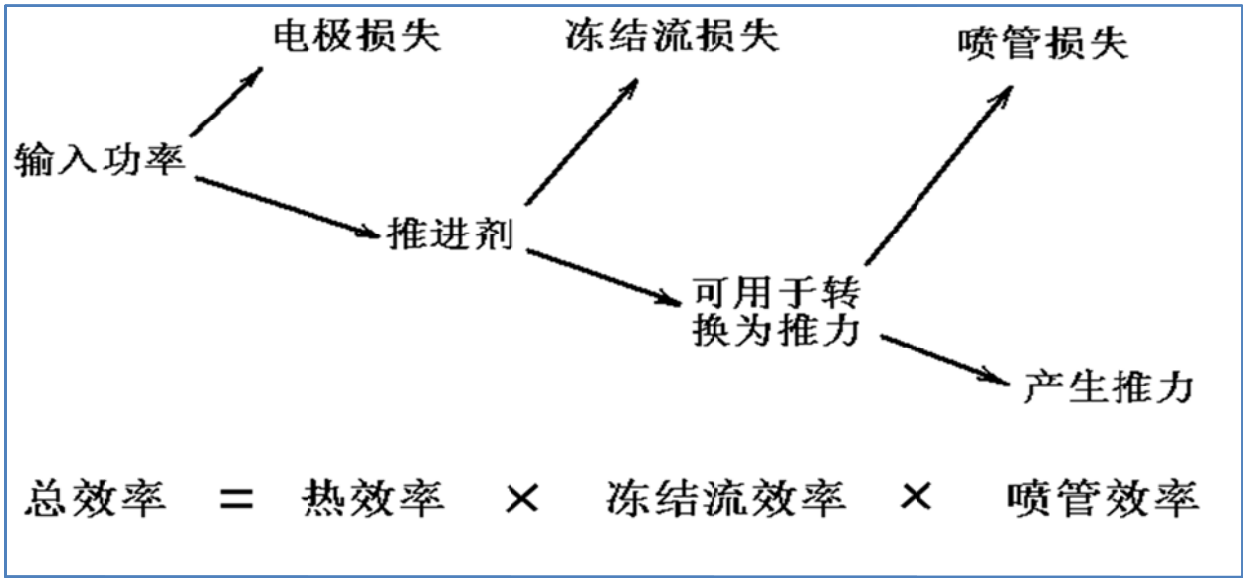


图 5 电弧加热推力器工作过程能量

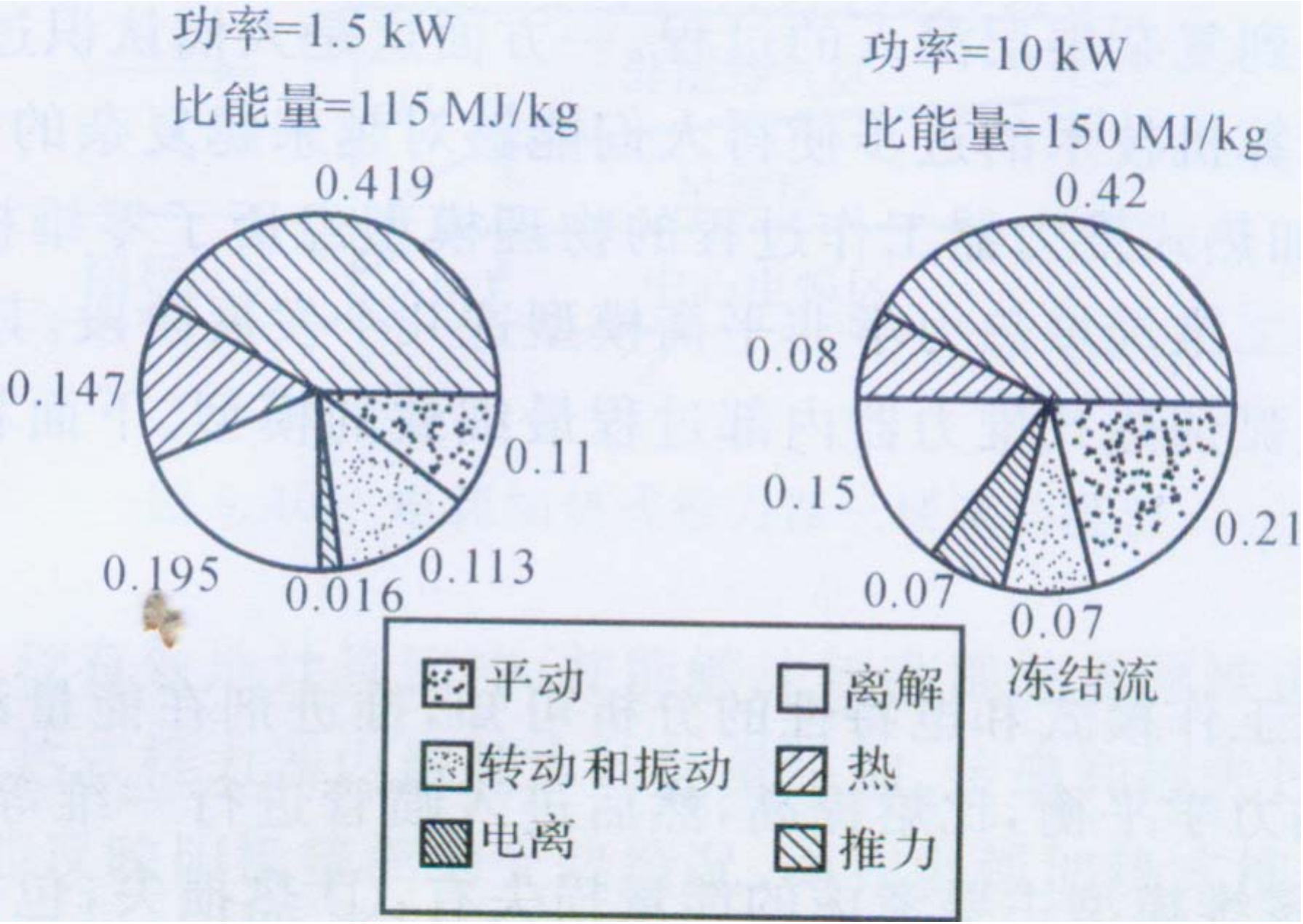


图 6 电弧加热推力器输出能量分布

11.3.4. 电弧加热推力器工作性能指标

- 比冲定义为单位推进剂质量流量能够产生的推力
- 推进效率即输入总电能中转换为定向喷气动能的比率，高推进效率的电弧加热推力器可以有效地利用所提供的电能
- 推力密度即单位喷气面积上所能产生的推力，对于电弧加热推力器而言即是总推力与喷管出口面积的比值
- 推力/功率比是推力器推力与输入功率的比值，大的推力/功率比保证了用较低的功率而获得高的推力水平
- 比功率定义为输入功率与推进剂质量流率的比值，它表示单位推进剂所接受的电能
- 推力器输入功率、寿命、系统质量

11.4. 电弧加热推力器的设计

11.4.1. 冷却方式

推力器温度高，需要冷却：

- 辐射冷却
- 再生冷却
- 强制冷却

11.4.2. 结构设计

阴极、阳极喷管及电弧室结构尺寸对推力器的性能影响很大，考虑的因素：

- 推进剂进入方式，可采用阴极和阳极两种进入方式，阳极较多；
- 推进剂喷管进气方式，可采用轴向、螺旋向和切向三种方式，螺旋向较多；
- 阴极尖到阳极喷管的距离，需要可靠起弧，小功率时一般 Lac<1mm；
- 阴极尖收敛半角；
- 阳极喷管收敛半角；
- 阳极喷管扩张半角；

- 阳极喷管电弧室直径（喉径）；小功率时一般 dt=0.5-0.6mm
- 阳极喷管电弧室长度，一般 Lcon=1-2mm；
- 喷管膨胀比，由压力公式确定。

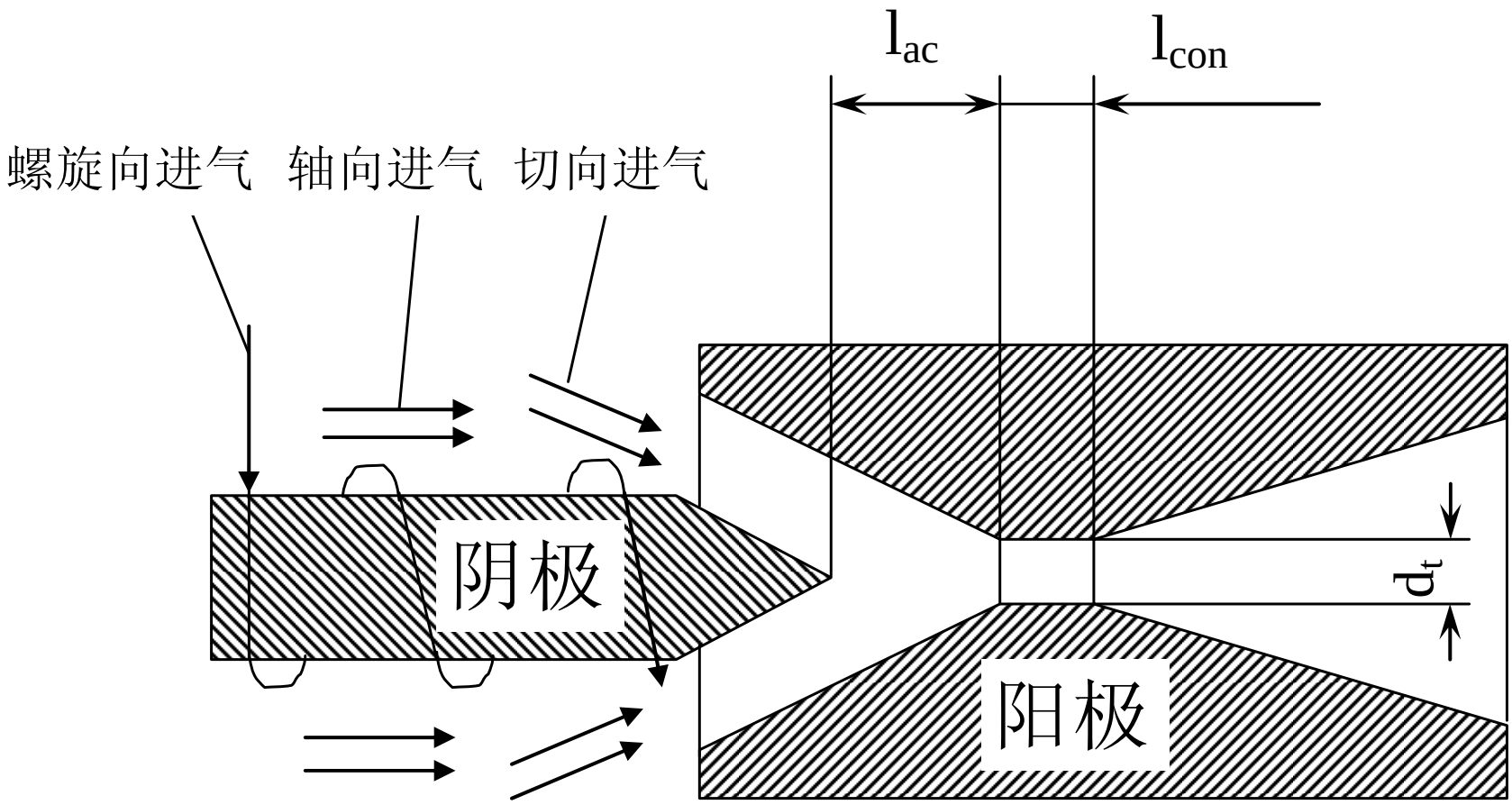


图 7 推力器阴极和阳极结构关系图

11.4.3. 推力器材料

- 电极材料
  - 阴极材料：小的电子发射逸出功和强的电子发射能力。
    - 钍钨、钍钨铼合金、钍铼
    - 钍钨（2%氧化钍）。
  - 阳极材料：耐高温、耐电弧烧蚀性能及引弧、稳弧和维弧性能好。
    - 纯钨、钍钨、钨铼、纯铼、钼铼、钼。
- 绝缘材料：耐高温、绝缘性能好、可加工。
  - 氧化铝陶瓷、可加工云母陶瓷、可加工氮化硼陶瓷材料。
- 密封材料
  - 柔性石墨垫片。
- 支撑部件材料
  - 耐高温的不锈钢或钼合金。

思考题：

1.电弧加热推力器有哪几部分组成；

2.电弧加热推力器输入电能的效率；

【1】现出了一些新的特点：

电弧加热推力器中电弧的形状和位置取决于推进剂气体介质的流动状况以及电弧与推进剂气体介质之间的物质能量交换情况，不同的流道形式下电弧加热推力器中电弧的形状和位置差别较大；

电弧加热推力器中电弧在电极上的附着形态也取决于流道结构形式和推进剂气体介质的流动状况，由于流动的影响，很多情况下电弧附着区并不固定，并且会出现一些弥散型的电弧附着形式；

电弧加热推力器中弧柱与其周围推进剂气体介质之间的物质能量交换更加复杂，并且在不同的位置具有不同的强度和特点，例如在超声速电弧加热推力器中，在阴极尖端附近弧柱很小，在其沿轴线向下游延伸的过程中，不断有推进剂气体介质在其边缘离解和电离并进入弧柱，使其截面积增大，同时消耗能量，在喷管扩张段由于膨胀导致推进剂气体温度迅速降低，于是不再有推进剂气体介质离解和电离进入弧柱，反而是弧柱中的粒子复合并释放能量；

电弧加热推力器中能量损耗机理更加复杂，静止气体介质中电弧消耗的电能主要以热传导的形式耗散于周围的环境中，一些情况下形成的自然对流会强化能量耗散过程；而在电弧加热推力器中由于流道的限制导致强迫对流占主导地位，强迫对流能够极为有效地输运物质和能量，并与其它过程强烈耦合，形成电弧加热推力器中复杂的物质能量转换过程。一般来说，在电流强度和流道几何形式相同的情况下，强迫对流会导致更大的能量耗散。

由于电磁场与高温电离气体的相互作用，电弧加热推力器中的能量转换过程非常复杂。推进剂气体以一定方式进入推力器后，通过由阴极和阳极构成的通道时，被电弧室轴线周围的高温电弧加热，形成高温电离气体，然后在阳极喷管中膨胀加速后高速喷出产生推力，其中一部分推进剂在高温下电离出带电粒子以维持电弧。电弧中心区的温度可高达 20000K 以上，远远高于化学火箭发动机内部的工作温度，因此推进剂可以获得很高的比焓。电弧室的主要作用是压缩电弧以增加弧柱电阻，进一步增加弧柱电压和输入功率，并加长推进剂气体与电弧的相互作用时间以便充分加热推进剂气体。

电弧加热推力器的工作原理与静电式等电推力器的工作原理不同，而与传统的化学火箭发动机的工作原理有些类似之处，它们都依靠推进剂气体在喷管中膨胀加速产生推力，只是在电弧加热推力器中推进剂气体的能量来源于电源提供的电能，电能首先以欧姆加热的形式和磁流体功的形式转化为推进剂的内能、化学能（这里是特指解离、电离等）和动能，然后复合反应将化学能转化为内能，内能最终转化为动能。在电弧加热推力器的各种内部物理过程中欧姆加热对推力器的性能起着决定性的作用，通过分析可以发现电弧加热推力器中的能量转换过程与传统的化学火箭发动机中的能量转换过程相比有其自身的特点：首先电弧加热推力器通过电弧放电来加热推进剂气体使其获得很高的能量，推进剂气体本身并不发生燃烧化学反应，而化学火箭发动机一般利用燃料和氧化剂之间的燃烧反应来提供能量；另外在电弧加热推力器中除了壁面散热损失、粘性损失和欠膨胀损失与在传统的化学火箭发动机中的原理相同外，其它损失的特点显著不同，如存在化学非平衡和热力学非平衡引起的非平衡损失、辐射损失、电极鞘层区损失等。

【2】内部过程具有如下特点[2]:

过程复杂多样并且各种过程强烈耦合。

(2) 空间狭小，使得各种物质和能量输运过程极其剧烈。

如 1 kW 量级的电弧加热推力器，典型的电弧室直径、长度仅为 0.6 mm 和 0.25mm，在膨胀比为 200 情况下喷管出口直径也仅为 8mm～ 9mm。电能主要是在电弧室内传给推进剂气体的，因此平均能流密度约 1.4×1010 kW/m3，足见其剧烈程度。

(3) 内部流动，尤其是喷管内流动明显偏离化学与热力学平衡，这与气体短暂的滞留时间有关。

根据其内部过程的特点可以将内部等离子体流动分为 5 个区域：

中心电弧区，即电弧室轴线附近的高温区域。

其中的等离子体具有很高的温度与电离度，欧姆加热是发生于该区域内的主要过程。欧姆加热的本质是：等离子体中的电子在电场作用下被加速而获得能量，但由于电子与其它粒子之间以及电子之间存在着极其频繁的碰撞，这些获取的能量不是转换为电子的定向动能，而耗散成了电子本身以及其它粒子无规律运动的热能。这些以欧姆加热方式获取的能量一部分存贮于等离子体内各种粒子的各种热力学能量模式中（平动、转动、振动、电子激发等）；另一部分以辐射、热传导或分子扩散的方式传递给其它周围气体，致使在弧柱区边缘附近发生强烈的离解与电离作用，同时提高这一区域内气体的热能；还有一部分能量直接以辐射方式被壁面所吸收。

包裹中心弧柱区的外围冷气流区。

该区域基本上由中性分子组成，电离度较小。其中的气体大部分以对流方式流向下游并进入喷管扩张段膨胀，一小部分在中心弧柱区边缘处被离解和电离后进入弧柱区，以维持那里的高温、高电离度等离子体。由于电离和离解作用相当耗能，由中心区通过热传导等方式传递过来的能量基本上在其边缘处被离解和电离作用消耗，能传入外围冷气流区的很少。那些少量的传入外围冷气流区的能量在该区域中沿径向传递，最后通过电弧室流入阳极，提高其温度。

中心膨胀区。

这是中心等离子体在喷管扩张段内的膨胀区域，与等离子体在此区域的膨胀同时进行的是离子-电子复合成原子以及原子-原子复合中性分子的过程。这些过程将以离解和电离方式储存的能量释放，释放出来的能量先转换成热能，再进一步转换成喷气动能。

外围膨胀区。

这是外围冷气流区中的冷气流在喷管中的膨胀区域。除了气体的膨胀区域外，在该区域内还存在着其它几个重要过程：1）粘性耗散过程；2）电流在由阳极流入中心弧柱区途中对气体的欧姆加热过程；3）由中心膨胀区通过热传导和粘性作用向该区域输运能量和动量过程。上述诸过程中，过程 1 降低了热能转换成定向喷气动能的能力；过程 2 提高了膨胀中气体的热能，但这些新注入的能量相当一部分通过热传导导入阳极而构成热损失。由于该区域气体由电弧室出口出来时本身就具有很低的电离度，电导率很小，为维持足够的电流密度需要有很大的电场强度，因此该区域内消耗的电功率在总电功率中占有一定的比例。

阳极鞘层区与阴极鞘层区。

由于热传导作用强制了电极鞘层区的温度必须与壁面温度相适应，而这个温度是不可能很高的，因而该区域不可能维持很高的电离度，电导率很低，要通过所要求的电流密度需要有很强的电场强度，因而有不少电功率消耗在该区域，这些消耗掉的电功率基本上以热的形式被电极所吸收，构成热损失。同时，以电极材料的熔化、蒸发、热电子的发射等，使其内部过程机制更为复杂。总的来说，这是一个强烈偏离化学与热力学平衡的区域。