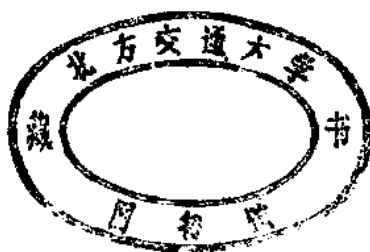


310/04

航空燃气涡轮发动机

尚 义 编著



国防工业出版社

前 言

本书系根据航空高等院校确定的教学大纲编写的。全书共分七章。第一章作为预备知识，阐述航空燃气涡轮发动机热力气动基础。第三章阐述发动机各部件知识。第二、四章着重介绍单轴涡轮喷气发动机总体参数和性能，如特性等问题，并简要地介绍双轴和加力涡轮喷气发动机的特性。第五、六、七章分别概略介绍涡扇、涡轴和涡桨发动机的工作特点和总体性能等问题。在编写中，着重阐明基本概念、基本知识和理论，并力求反映当前国内外的实际情况和先进水平。

通过对本教材的学习，使读者掌握作为飞机动力装置的航空燃气涡轮发动机的工作原理、特性和主要性能指标的意义。对整台发动机的工作过程和特性有一个较完整的概念，对各部件的作用也有一般的了解。

本课程只要求学生具备普通物理的知识即可进行学习。如果已经学习过气体动力学和工程热力学，则第一章的内容可以从略。

本书由徐子骏、徐敦铨主审。

北京航空学院张津和西北工业大学俞金梯对全书进行了审核。南京航空学院马申义、王琴芳、胡世民、刘德彰、汤国才、江山也对全书或部分章节提出了许多宝贵的意见，特此表示感谢。

限于作者的理论水平和实践经验，书中必有不少缺点和错误，切望读者批评指正。



目 录

主要符号	1	§ 4 涡轮喷气发动机的演变-类型	41
绪论	3	(一) 加力式涡轮喷气发动机	41
第一章 航空燃气轮机热力气动		(二) 冲压式喷气发动机	42
基础	5	(三) 涡轮风扇喷气发动机	43
§ 1 热力学第一定律	5	(四) 加力式涡轮风扇喷气发动机	45
(一) 理想气体的状态方程式	5	(五) 涡轮螺旋桨发动机	46
(二) 比热和热量	5	(六) 涡轮轴发动机	47
(三) 工质的内能	6	(七) 可变循环喷气发动机	47
(四) 外功	7	复习题	49
(五) 工质的焓	7	第三章 涡轮喷气发动机部件	50
(六) 热力学第一定律	8	§ 1 进气道	50
(七) 热力过程	8	(一) 亚音速进气道	51
§ 2 热力学第二定律	11	(二) 超音速进气道	52
(一) 气体工质的熵	11	§ 2 压气机	56
(二) 热力学第二定律	12	(一) 压气机类型和结构形式	56
(三) $T-s$ 图和 $h-s$ 图	13	(二) 基本方程式	58
(四) 循环和循环效率	15	(三) 轴流式压气机	63
§ 3 气体动力学的基本方程	16	(四) 离心式压气机	70
(一) 连续方程	17	(五) 压气机特性	73
(二) 能量方程	17	§ 3 燃烧室	81
(三) 伯努利方程	18	(一) 基本性能要求	81
(四) 音速和马赫数	19	(二) 燃烧室结构形式	84
(五) 气流的滞止参数和气动函数	19	(三) 燃烧室工作过程和主要零组件	86
(六) 动量方程	21	(四) 燃烧室特性	96
(七) 动量矩方程	22	§ 4 涡轮	92
(八) 膨胀波和激波	22	(一) 结构形式	92
复习题	23	(二) 工作原理	95
第二章 燃气涡轮发动机的工作原理	25	(三) 涡轮特性	97
§ 1 涡轮喷气发动机热力循环	25	§ 5 加力燃烧室	98
(一) 理想循环	25	(一) 基本性能要求	98
(二) 实际循环	26	(二) 加力燃烧室工作过程和主要零组件	99
§ 2 推力的产生	28	§ 6 喷管	100
(一) 推进功率和推进效率	30	(一) 工作原理	100
(二) 总效率	31	(二) 结构形式	103
(三) 沿流程参数变化	32	复习题	106
(四) 推力在各部件上的分配和传递	32	第四章 涡轮喷气发动机	108
§ 3 涡轮喷气发动机的性能指标和基本要求	33	§ 1 各部件的共同工作	108
(一) 性能指标	33	(一) 共同工作的条件	108
(二) 基本要求	35	(二) 调节规律的讨论	111
(三) 发展方向	38	(三) 共同工作线	113
(四) 发动机与飞机一体化设计的概念	40	§ 2 发动机特性	116
		(一) 转速特性	116

(二) 速度特性	118	第六章 涡轮轴发动机	160
(三) 高度特性	123	§1 基本工作原理和主要参数	161
(四) 过渡状态特性	125	(一) 自由涡轮式和定轴式涡轮轴发动机	161
§3 发动机通用特性和台架性能换算	128	(二) 主要参数	162
(一) 发动机相似工作条件	129	§2 部件特点	163
(二) 发动机的通用特性	129	(一) 进气装置	163
(三) 台架性能换算	130	(二) 压气机	164
§4 双轴涡轮喷气发动机	131	(三) 燃烧室	164
(一) 双轴涡轮喷气发动机的工作特点	132	(四) 涡轮	165
(二) 双轴式涡轮喷气发动机的共同工作	133	(五) 排气喷管	165
(三) 双轴涡轮喷气发动机的调节规律和特性	135	(六) 减压器	165
§5 加力涡轮喷气发动机	137	§3 各部件的共同工作和调节规律	166
(一) 加力的工作特点	137	(一) 各部件的共同工作方程	166
(二) 加力涡轮喷气发动机的调节和特性	140	(二) 调节规律	168
(三) 喷液加力	142	§4 涡轮轴发动机特性	170
复习题	143	(一) 转速特性	170
第五章 涡轮风扇喷气发动机	144	(二) 高度特性	172
§1 基本工作原理和性能特点	144	(三) 速度特性	172
(一) 基本工作原理	144	复习题	174
(二) 主要的过程参数	145	第七章 涡轮螺旋桨发动机	175
(三) 不加力涡轮风扇喷气发动机的特点	146	§1 基本工作原理和参数	175
(四) 加力涡轮风扇喷气发动机的特点	147	(一) 性能参数	176
§2 部件特点	147	(二) 过程参数	178
(一) 风扇	148	§2 各部件的共同工作和调节规律	178
(二) 压气机	149	(一) 各部件的共同工作方程	178
(三) 燃烧室	149	(二) 调节规律	180
(四) 涡轮	149	§3 涡轮螺旋桨发动机特性	181
(五) 混合器	150	(一) 节流特性	181
(六) 加力燃烧室	151	(二) 速度特性	182
§3 各部件的共同工作和调节规律	151	(三) 高度特性	183
(一) 各部件的共同工作方程	151	§4 涡轮螺旋桨发动机发展中的问题	184
(二) 调节规律	155	(一) 当前所使用的涡轮螺旋桨发动机	184
§4 涡轮风扇喷气发动机特性	156	(二) 螺旋桨风扇发动机	184
(一) 速度特性	156	(三) 带回热装置的涡轮螺旋桨发动机	185
(二) 高度特性	157	复习题	186
(三) 转速特性	158	主要参考书	186
复习题	159		

主要符号

A	面积	$Q_1(Q)$	实际放热量
c	比热; 音速	Q_0	燃油完全燃烧时的放热量
c_p	空气的定压比热	Q_p	定压加热量
c'_p	燃气的定压比热	Q_v	定容加热量
c_v	空气的定容比热	Q_{v1}	燃烧室火焰筒容热强度
D	直径	q	动压头
\bar{d}	轮毂比	$q_1(q)$	对单位工质的加热量
F	推力	q_2	单位工质的放热量
F_A	单位迎面推力	q_0	一公斤燃油完全燃烧时的放热量
F_{eff}	有效推力	q_m	工质或空气的质量流量
F_{in}	发动机内部的作用力	q_{m1}	燃油的质量流量
F_{out}	发动机短舱外部的作用力	q_{m2}	燃气的质量流量
F_s	单位推力	q_p	对单位工质的定压加热量
F_w	推重比	q_v	对单位工质的定容加热量; 容积流量
f	油气比	R	空气的气体常数
H	飞行高度	R'	燃气的气体常数
H_u	燃油的低热值	Re	雷诺数
h	单位工质的焓	r	半径
i	攻角	s	单位工质的熵
i_r	减速比	sfc	单位燃油消耗率
K	用气动函数计算流量时的空气常数	T	温度
K'	用气动函数计算流量时的燃气常数	u	单位工质的内能; 圆周速度
l_0	一公斤燃油完全燃烧时所需要的理论空气量	V_1	燃烧室火焰筒容积
M	力矩	v	速度; 比容
Ma	马赫数	W	重量; 单位工质对外所作的功
m	工质质量	W_f	单位工质流动摩擦损失功
n	转速; 多变指数	W_{re}	单位工质向减速器输出的功
P	功率	W_u	单位工质的轮缘功
P_e	发动机功率	w	相对速度
P_m	功率质量比	X	涡轮风扇喷气发动机涡轮能量分配比
p	压力	x_2	附加阻力
		x_f	摩擦阻力

Y	内外函道的流量参数, 简称函道比	f	燃油
α	余气系数; 叶栅中气流绝对速度与额线的夹角; 喷雾锥角	g	燃气
β	叶栅中气流相对速度与额线的夹角; 功率与推力的当量常数	H	高压部件
β_k	叶栅结构角	h	叶根
δ	落后角; 径向间隙	i	进气道
Δ	轴向间隙	in	内部
η	效率	K	压气机
η_c	完全燃烧效率	L	低压部件
η_m	机械效率	m	平均; 测量截面; 质量
η_p	推进效率	n	多变过程
η_r	热效率	p	螺旋桨
η_o	总效率	R	转子
γ	空气的比热比	r	旋翼; 回热
γ'	燃气的比热比	S	静子
λ	速度系数	sk	激波
μ	离心叶轮的功率系数	st	起动
φ	进气道流量系数; 桨距角	T	涡轮; 温度
ρ	工质的密度	t	叶尖
σ	总压恢复系数	u	切向
π	增压比或落压比	*	总参数角标
θ	加温比; 叶片的弯折角; 角位移; 燃烧效率的相似准则数	I	内函道
	下 标	II	外函道
a	轴向	0	远前方未扰动气流参数; 地面台架参数
ad	等熵	01	进气道进口
af	复燃加力	1	压气机进口; 叶栅进口; 热力过程的初始状态; 燃气发生器涡轮
b	燃烧室	1.1	高压压气机进口
cor	换算参数	2	压气机出口; 叶栅出口; 热力过程的终了状态; 自由涡轮
cr	临界参数	3	涡轮进口; 静止叶栅出口
d	设计点参数	3.1	低压涡轮进口
dx	涡轮导向器	4	涡轮出口
e	喷管	5	混合器进口
ea	喷管临界截面后	6	加力燃烧室进口
eb	喷管临界截面前	7	喷管进口
eq	当量参数	8	喷管喉道
		9	喷管出口

绪 论

航空技术自从 1903 年莱特兄弟第一架飞机问世以来，经过八十多年的发展，今天已经取得了巨大的成就。不论是军用或民用，为了满足各个时期所提出的不同要求，飞机的性能不断地得到提高。例如，作战飞机在机动性方面，民用飞机在节能和可靠性方面，当前都达到了一个新的水平。在发展中，不同类型的飞机，有各自不同的要求，航空飞行器作为一个整体，各类飞机的发展也不是孤立的，在技术上是相互借鉴和紧密联系的。应当指出，在它们之中，在技术的相当多方面处于领先地位的是歼击机。这是因为歼击机是要直接与对方交战的，没有优越的性能，就不能处于主动的地位，就不能掌握制空权。所以，在航空技术的发展中，歼击机是技术更新最快的机种。显然，一架五十年代初期设计投产的民航机，虽然性能较差，但今天仍有可能在航线上使用，或甚至继续生产；但一架同期设计投产的歼击机，今天使用它就相形见绌了。

歼击机性能的提高，在很大程度上取决于动力装置的发展。在第二次世界大战之前，飞机上使用的动力装置都是由航空活塞式发动机和螺旋桨组成。

航空活塞式发动机的工作原理与地面上使用的活塞发动机一样，是人所共知的。发动机产生的功率通过减速器（降低转速和增加扭矩）传输给螺旋桨，使螺旋桨以较低的转速旋转，产生飞机前进所需要的拉力。因此，可认为动力装置是由航空活塞式发动机（作为热机）和螺旋桨（作为推进器）两部分组成的。

在第二次世界大战发生前后，为了满足作战飞机的要求，这种动力装置得到了很大的发展。当时主要是要求飞机能飞得快、飞得高、飞得远。在当时看来，只有飞得快、飞得高才能使自己处于有利的地位，克敌制胜，只有飞得远才能深入对方的战略后方。为此，在技术上较先进的各主要交战国，先后研制了一批功率大，重量轻，耗油率低，工作可靠的航空活塞式发动机。例如某些航空活塞式发动机，功率达到 1400 kW，重量在 1000kg 左右，巡航飞行时，每 kW/h 消耗油约为 0.27kg。装用航空活塞式发动机的飞机，飞行速度达到 750~800 km/h。但是，这种动力装置在继续发展中受到了限制，它不能满足飞行速度进一步提高的要求。当飞行速度进一步增加，特别是在接近音速时，飞机的阻力急剧增加，而螺旋桨的效率却急剧下降，大功率的发动机又受到重量的限制。另一方面，随着飞行高度的增加，功率将迅速下降，例如在 5000m 高度，有效功率约为地面有效功率的一半，同样，也满足不了飞机在飞行高度上的要求。

在第二次世界大战期间，技术上较先进的各主要交战国都迫切地企图在航空发展上有所突破，特别是在航空动力装置方面，力求使自己处于领先的地位。因而都竞相研制涡轮喷气发动机。在这场竞争中，首先独立研制成功的是德国和英国。在第二次世界大战后，有美苏两国在自己研制的基础上引进了专利和从德国获得战利品，在仿制的同时，很快就过渡到自行研制。

涡轮喷气发动机具有功率大，重量轻的特点，在它出现后不久，飞机的速度就突破了“音障”，随后又出现了二倍音速，甚至三倍音速的飞机；在飞行高度上，飞机的静

升限达 10000 m, 20000 m 甚至 30000 m 的高度。当前, 在作战飞机的设计中已不再为提高最大飞行速度和最大飞行高度而花费过多的精力。

就涡轮喷气发动机的热力循环(布莱顿循环)的原理而言, 早在 1872 年已经被发现和提出, 甚至比活塞式发动机定容燃烧循环的提出还早几年。但在实践中, 出现涡轮喷气发动机是在活塞式发动机发展到相当完善的程度之后。这并不是偶然的, 也不是出于某些战争组织者的愿望。除了战争发展的迫切需要, 技术上是否具有发展涡轮喷气发动机的可能性也是不可忽视的, 因为直到三十年代末期, 才具备发展涡轮喷气发动机的条件。这主要从以下三个方面来说明: 首先是设计与试验技术都有了新的进展或突破, 例如作为涡轮喷气发动机的主要部件, 压气机和涡轮, 有了航空活塞发动机发展废气涡轮增压器的设计试验基础, 提供了可供借鉴的经验; 其二是出现了耐高温的合金材料; 其三是制造工艺技术的发展, 例如能加工型面精度要求较高的压气机和涡轮的叶片等零组件。

在当前, 涡轮喷气发动机发展了四十多年, 是否也到了如当年从活塞到喷气类似的更新换代的时候呢? 正如从活塞到喷气, 下一步将从喷气到什么呢?

类似以上的问题, 早在五十年代的后期就曾经活跃了一阵, 当时也有人认为涡轮喷气发动机的发展也快到尽头了。这首先是因为原子弹和导弹的迅速发展, 错误地认为飞机在战争中的作用已退为次要的地位, 其次还认为要满足飞机不断提高飞行速度的要求, 应当发展冲压式发动机或火箭发动机。

不久就发现导弹代替不了飞机, 目前作战飞机对飞行速度的要求, 到不了该用冲压式发动机或火箭发动机作为动力装置的程度。

在随后的二十多年的发展中, 特别是从涡轮喷气发动机演变出并得到了发展的涡轮风扇喷气发动机和带加力的涡轮风扇喷气发动机出现时, 飞机的性能又提高到一个更新的水平。

直到今天, 我们仍然可以肯定地说, 航空燃气涡轮发动机, 不论是作战飞机上用的带加力的涡轮风扇喷气发动机, 也不论是民航机或军用运输机上用的涡轮风扇喷气发动机, 或直升机上用的涡轮轴发动机, 或甚至民航机或军用运输机上用的涡轮螺旋桨发动机, 在各自的领域里都还有广阔的发展前景。例如为改善作战飞机的性能在提高推力重量比方面, 为增加航程、减少能源消耗在降低耗油率方面, 都还有很大的发展潜力。

根据以上的分析, 可以明确地说, 今天的航空燃气涡轮发动机虽然已经发展了四十多年, 但还远没有到不能进一步发展的地步。有关它们的今天和明天, 正是本书内容的一个方面, 将在后面的章节中给予介绍。

第一章 航空燃气轮机热力气动基础

航空燃气轮机首先是一种热机。既是热机就有许多热机的共性规律，其中主要是热力学第一、二定律。此外，燃气轮机不同于活塞式内燃机，气体工质经过其中各个部件时是连续不断地流动，因此，有大量的气体动力学问题，特别是一元管流问题。为了较全面地了解和分析航空燃气轮机的工作原理、性能以及它的发展状况，有必要将上述提到的知识内容在本章内作如下的概括介绍。

§1 热力学第一定律

(一) 理想气体的状态方程式

理想气体的定义是：分子本身只有质量而不占有体积，分子间不存在吸引力的气体。

实际上，理想气体并不存在。但是在燃气轮机中所用的工质，不论是进入的空气或是燃烧后生成的燃气，在当前发动机工作的温度和压力范围内，气体分子本身的体积与工质微团所占有的体积相比，实在很小，以致可以忽略气体分子本身所占有的体积；同时由于分子与分子间的距离很大而单个分子的质量又很小，以致可以忽略引力的存在。因此，空气或燃气，在燃气轮机的热力循环中都可以作为理想气体处理，并满足理想气体的状态方程式：

$$pv = RT \quad (1-1)$$

式中 p ——气体压力， N/m^2 ；

v ——气体比容，每公斤气体的容积， m^3/kg ；

T ——气体绝对温度， K ；

R ——气体常数， $J/kg \cdot K$ ；对空气取287.1，对燃气，与成分有关，在燃气轮机中一般可取288。

(二) 比热和热量

热量是能量交换中的一种形式，没有能量交换或变换，也就没有热量可言。热量的计算可按公式：

$$Q = mc(T_2 - T_1) \quad (1-2)$$

式中 Q ——热量， J ；

m ——工质质量， kg ；

T_1 、 T_2 ——交换能量前后工质的温度， K ；

c ——比热， $J/kg \cdot K$ 。

比热的定义是：使1 kg工质温度升高1度时所需要吸收的热量。

比热并非常数，它与工质的成分和温度有关，而且还与工质的工作过程有关。

例如, 对一个容积不变的密闭容器中的工质加热, 加热量为

$$Q_v = mc_v(T_2 - T_1)$$

又如对一个气球里的工质加热, 假定气球表面没有张力, 气球内外的压力始终保持相等, 加热量为:

$$Q_p = mc_p(T_2 - T_1)$$

上面两例, 工质相同, 温升一样, 而加热量不一样, 前者叫定容加热, 用 c_v 表示定容比热; 后者叫定压加热, 用 c_p 表示定压比热。

工质一定, 定容比热和定压比热都是温度的函数, 如

$$c_p = a + bT + cT^2 + dT^3 + \dots \quad (1-3)$$

式中 a, b, c, d, \dots 为常数。

高次项的系数衰减很快, 按燃气轮机的燃气温度, 一般取温度的三次或五次项以前的各项就足够了。

因为比热是温度的函数, 则热量计算公式可表为:

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} c(T) dT = mc \Big|_{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1)$$

式中 $c \Big|_{T_1}^{T_2}$ ——工质温度在 T_1 到 T_2 范围内的平均比热, J/kg·K。

在热力气动中经常用到的参数是比热比

$$\gamma = c_p / c_v \quad (1-4)$$

对于空气一般可取1.4, 对于燃气一般可取1.33。

(三) 工质的内能

工质的内能是工质分子动能和势能的总和。对于理想气体, 分子间没有引力的作用, 因而也没有势能可言。所以, 工质的内能也就是工质分子动能的总和。从分子运动学得知, 分子动能的大小宏观的体现就是气体温度的高低, 因而内能只是温度的单值函数, 即

$$u = u(T) \quad \text{J/kg} \quad (1-5)$$

实践证明, 这一结论适用于接近理想气体的空气和燃气。

类似于上面曾举过的例子, 对容积不变的密闭容器中的1 kg气体质量加热, 温度从 T_1 到 T_2 , 加热量为

$$q_v = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T) dT = c_v(T_2 - T_1) \quad \text{J/kg}$$

式中 c_v ——平均定容比热。

在这个加热过程中, 容器的容积不变, 与外界没有其他形式的能量交换, 因此, 加给工质的热量将全部转化为工质的内能, 即内能的增量

$$\Delta u = u_2 - u_1 = q_v = c_v(T_2 - T_1) \quad (1-6)$$

我们知道, 内能是温度的单值函数, 同样, 内能的增量也只与温度的增量 $T_2 - T_1$ 有关。由此可知, 上式 $\Delta u = c_v(T_2 - T_1)$ 虽然是通过引用定容加热的例子得到的关系, 在其他热力过程中, 无疑也同样适用的。

在实际应用中, 讨论内能的绝对值往往是没有意义的。我们所关心的只是经过某个热力过程之后, 工质内能的增量 Δu 。从一般书上所能看到的内能数据, 实际上也都是些

相对数值。例如假定温度为零度时的工质内能 $u_0 = 0$ ，而其他任意温度 T 时的内能值则为

$$u_T = \int_0^T c_v(T) dT \quad (1-7)$$

(四) 外 功

在热力过程中，气体膨胀，推动外界物体而做功，如在气缸内气体膨胀，推动活塞而做功，称为膨胀功。反之气体被压缩时，外界对气体做功称为压缩功。按照一般功的定义，即作用力乘位移。1 kg工质容积膨胀 dv ，对外所作的功可表为

$$dW = p dv \quad (1-8)$$

容积膨胀从 v_1 到 v_2 ，单位工质对外所作功可表为上式的积分：

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad (1-9)$$

如当压力 p 不变，则得

$$W = p(v_2 - v_1)$$

如当容积 v 不变，则得

$$W = 0$$

外功有正负之分，通常取定工质对外界所作功为正，外界对工质所作功为负。

(五) 工 质 的 焓

焓的定义，可按公式表示为

$$h = u + pv \quad \text{J/kg} \quad (1-10)$$

因为 $u = u(T)$ 和 $pv = RT$ ，代入上式可得

$$h = u(T) + RT = h(T) \quad (1-11)$$

由此可知，理想气体的焓，也是温度 T 的单值函数。

用上面曾举过的另一个例子，对没有张力的气球加热，其中1 kg气体温度从 T_1 到 T_2 ，保持压力与外界一致，比容从 v_1 到 v_2 。加热量为

$$q_p = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT = c_p(T_2 - T_1) \quad \text{J/kg} \quad (1-12)$$

式中 c_p ——平均定压比热。

在这个加热过程中，在定压下容积膨胀，对外界做了功。因此，加给工质的热量除了增加气体的内能之外，还对外作了功，公式(1-12)还可表为

$$\begin{aligned} q_p &= c_v(T_2 - T_1) + p(v_2 - v_1) = c_v(T_2 - T_1) + R(T_2 - T_1) \\ &= (c_v + R)(T_2 - T_1) = \Delta h \end{aligned} \quad (1-13)$$

类似于内能，我们可以知道 $\Delta h = c_p(T_2 - T_1)$ ，焓也是气体的属性，与热力过程无关。

此外，还可以通过公式(1-12)和(1-13)推导得

$$c_p = c_v + R$$

或

$$c_p = \frac{\gamma}{\gamma - 1} R \quad (1-14)$$

(六) 热力学第一定律

热力学第一定律是体系中能量守恒和转换定律在热力学中的应用。具体地说是热量、内能和机械能之间的相互转换和守恒的关系。它是我们研究热机的理论基础。

当 1kg 气体处于静止状态时，对它加入一微元的热量 dq ，这将转换为气体内能的增加 du 和气体膨胀对外所作的功 $p dv$ 。它们之间的关系表示为

$$dq = du + p dv \quad (1-15)$$

这就是静止气体的热力学第一定律的解析式。由于

$$h = u + pv$$

则得解析式的另一种形式

$$dq = dh - v dp \quad (1-16)$$

积分上式，得

$$q = h_2 - h_1 - \int_{p_1}^{p_2} v dp = c_p(T_2 - T_1) - \int_{p_1}^{p_2} v dp$$

上述方程，如果用 $p-v$ 图表示，如图 1-1 所示。气体工质从状态 1 到状态 2，不论过程的路线如何， Δu 和 Δh 都是一定的。所以，我们把内能 u ，焓 h 和温度 T ，压力 p ，比容 v 一起都称之为状态参数。状态参数的特点是：它们的变化仅与过程的始点和终点有关，而与过程的路径无关。与这相对应的是过程参数，其特点是：它们的变化不仅与过程的始点和终点有关，而且还与过程的路径有关。例如功 W 和热量 q 就是过程参数。从图 1-1，并结合公式 (1-15) 和 (1-16)，可以看出，沿着路径 A 或 B ，功 $\int_1^2 p dv$ 或 $\int_1^2 v dp$ 是不同的，因而加热量 q 也是不同的。

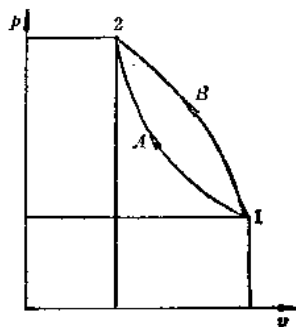


图 1-1 $p-v$ 图上任意过程的表示

(七) 热力过程

气体从某一状态变化到另一状态，中间经历着状态参数连续变化的过程，叫做热力过程。

1. 定容过程

气体在容积保持不变的条件下所经历的热力过程，叫做定容过程。

过程方程可表为

$$v = \text{常数}$$

气体状态参数间的关系可表为

$$p_2/p_1 = T_2/T_1$$

能量转换关系

$$W = 0$$

则

$$q = \Delta u = c_v(T_2 - T_1)$$

在定容加热过程中，加给气体的热量，全部用来增加气体的内能。反之，在定容放

热过程中，气体向外放出的热量，恰恰等于气体内能的减少量。

2. 定压过程

气体在压力保持不变的条件下所经历的热力过程，叫做定压过程。

过程方程可表为

$$p = \text{常数}$$

气体状态参数间的关系可表为

$$v_2/v_1 = T_2/T_1$$

能量转换关系

$$\Delta u = c_v(T_2 - T_1)$$

$$W = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1)$$

$$q = \Delta u + W = c_p(T_2 - T_1)$$

在定压加热过程中，加给气体的热量除了增加气体的内能之外，还对外作了功，且两者有一定的比例。

3. 定温过程

气体在保持温度不变的条件下所经历的热力过程，叫做定温过程。

过程方程可表为

$$T = \text{常数}$$

气体状态参数间的关系可表为

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

能量转换关系

$$\Delta u = 0$$

$$q = W$$

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$$

在定温加热过程中，加给气体的热量全部用于对外做功，气体的内能不变。

4. 绝热过程

气体在与外界没有热交换的条件下所经历的热力过程，叫做绝热过程。

过程方程可表为

$$q = 0$$

气体状态参数间的关系可表为（推导从略）

$$pv^\gamma = \text{常数} \quad (1-17)$$

或

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^\gamma = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

式中 γ 就是公式(1-4)所表示的比热比，通常也叫绝热指数。

能量转换关系

$$W = -\Delta u = c_v(T_1 - T_2) = \frac{R}{\gamma - 1}(T_1 - T_2) = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad (1-18)$$

上面四个过程在 $p-v$ 图上的表示如图 1-2 所示。如果初始状态 1 是共同的，压缩或膨胀沿着各自不同的过程到达不同的终点状态。

5. 过程的不可逆性和多变过程

若有某种热力过程，既可以正向进行，也可以逆向进行，在逆向过程中，不仅气体所经历的全部状态都与正向过程中所经历过的相同，最后能回到起始状态，而且参与这个变化过程的物体也都恢复到最初的情况，没有引起其他任何变化。则这种热力过程叫做可逆过程。否则，就叫做不可逆过程。

可逆过程必须是：在气体工质内部的压力和温度始终保持均匀一致，且没有摩擦，其中包括气体内部的摩擦、气体和机件之间的摩擦，以及机件与机件之间的摩擦。

如果我们实现了某种过程，在这一过程中，始终保持气体工质的压力和温度均匀一致的变化，与外界没有热量交换，摩擦所产生的热加入到气体工质本身。这种过程通常叫做不可逆绝热过程，它的特点是没有外热，但有摩擦所产生的“内热”。与此相反，既没有外热，也不产生“内热”的过程，就叫做可逆绝热过程，也就是上面一节中提到的绝热过程。

不可逆绝热过程是一种多变过程。但有时把多变过程这名称作为所有过程的总称，气体状态参数间的关系可表为

$$pv^n = \text{常数}$$

或

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{n}{n-1}}$$

式中 n 为多变指数。对于上述四个特定的热力过程，多变指数值是：

定压过程 $n = 0$ ，过程方程为 $p = \text{常数}$

定容过程 $n = \infty$ ，过程方程为 $v = \text{常数}$

定温过程 $n = 1$ ，过程方程为 $T = \text{常数}$

绝热过程 $n = \gamma$ ，过程方程为 $pv^\gamma = \text{常数}$

不可逆绝热过程，压缩时 $n > \gamma$ ，膨胀时， $1 < n < \gamma$ 。

多变功的表达式

$$W_n = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2) = \frac{RT_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{n-1} \right] = \frac{RT_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \quad (1-19)$$

从上述的公式中，看不出不可逆性“内热”的特点，所以，从图 1-3 上反映，从状态 1 压缩到同样的比容，与可逆绝热过程相比，只增加了面积 122'1 所表示的压缩功，而膨胀到同样的比容，与可逆绝热过程相比，反而增加了面积 13'31 所表示的输出功，这似乎是摩擦的存在反而对功的输出是有利的。其实这是误解。这是因为摩擦而消耗的一部分机械功没有在公式或 $p-v$ 图中直接反映出来。实际上在多变压缩过程中，外界对气体所作的功应当是

$$W = W_n + q_{in} \quad (1-20)$$

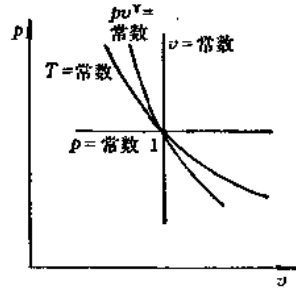


图 1-2 $p-v$ 图上四个过程表示

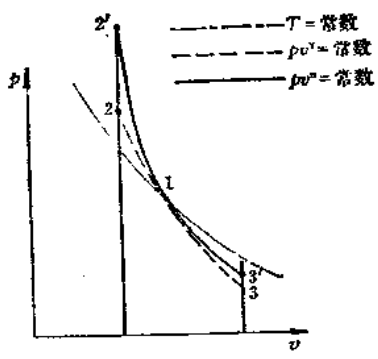


图1-3 $p-v$ 图上多变过程功的表示

q_{in} 表示摩擦所消耗的机械能。实际上，在多变膨胀过程中，气体工质向外界输出的功应当是

$$W = W_s - q_{in} \quad (1-21)$$

这表示由于摩擦损失，减少了机械能的输出

§ 2 热力学第二定律

(一) 气体工质的熵

熵是一个很抽象的热力学参数，它的定义可用如下公式表示

$$ds = \frac{dq}{T} \quad \text{J/kg} \cdot \text{K} \quad (1-22)$$

对于可逆过程，因为只有外热， $dq = du + pdv$ ，代入上式，得

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$$

从状态 1 到状态 2，积分上式，得熵的增量

$$\left. \begin{aligned} \Delta s &= c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \\ &= c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \\ &= c_p \ln \frac{v_2}{v_1} + c_v \ln \frac{p_2}{p_1} \end{aligned} \right\} \quad (1-23)$$

从上式得知，熵的增量 Δs 只取决于始点和终点的状态参数，而与过程的路线无关。由此可知，熵也是一个状态参数。可表为任意两个其他状态参数的函数，如

$$s = s(p, T) \quad (1-24)$$

熵既是一个状态参数，我们就可以按照熵的定义计算可逆过程中与外界交换的热量。

$$dq = T ds \quad \text{J/kg}$$

此式表示， dq 和 ds 同号，加热则熵增加，放热则熵减少。

从状态 1 到状态 2，积分后，可得

$$q = \int_{s_1}^{s_2} T ds \quad (1-25)$$

通过上式可作出温熵 ($T-s$) 图, 如图 1-4 所示。从状态 1 到状态 2, 经过程线 $T=T(s)$, 这时候 $ds > 0$, 所以 q 为正, 积分的面积 $\square 1a22'1'1$ 即为加热量; 从状态 2 到状态 1, 经另一过程线 $T=T'(s)$, 这时候 $ds < 0$, 所以 q 为负, 积分的面积 $\square 2b11'2'2$ 即为放热量。

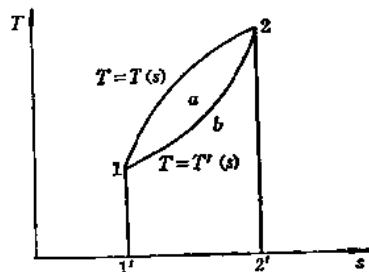


图1-4 $T-s$ 图上任意循环表示

如果过程是不可逆的, 定义式(1-22)中的 dq 应当包括 dq_{im} , 即除了与外界交换的热量之外, 还包括摩擦损耗后仍加给气体的热量。热量的计算仍可按式(1-25)进行。但必须指出, 这时候的热量 q 在数值上要大于仅与外界交换的热量。只有当在可逆过程下, 以过程线包围的面积 $\square 1'1a22'1'$ 所代表的热量 q 才表示外热。

(二) 热力学第二定律

热力学第二定律是人们从实践中总结出来的客观规律。但是, 人们各自所观察的对象不同, 看到的现象也不同, 因而对热力学第二定律的说法或表达的形式也不同。必须强调指出, 尽管说法不同, 但并不影响热力学第二定律概念的一致性, 因为不同的说法, 都是等价的, 这就是说由一种说法可以推论出另一种说法。

热力学第二定律的说法之一是: 自然界中凡是有关热现象的自发过程都是不可逆的。

例如一个容器被对分成两个部分, 1kg 质量的气体占有容器的一半容积, 另一半是真空。当抽掉隔板之后, 气体必然会自发地占有整个容器。如果外界不给予任何条件, 气体是不会自发地回到原来的状态, 使自己占有一半容积, 留一半保持真空。这就是自发过程的不可逆性。

从这个例子, 我们发现, 在抽开隔板之后熵是增加的, 增量为

$$\Delta s = c_p \ln \frac{v_2}{v_1} + c_v \ln \frac{p_2}{p_1} = (c_p - c_v) \ln 2$$

因为 $c_p > c_v$, 所以 Δs 为正。

热力学第二定律的说法之二是: 如果不消耗外功, 热不可能从温度较低的物体自发地传到温度较高的物体。

例如两个温度不同的物体彼此接触, 热会从温度较高的物体自发地传给温度较低的物体, 这是一种自发过程。反之, 热决不会从温度较低的物体自发地传到温度较高的物体。

从这个例子中, 我们也发现, 热从高温物体传到低温物体, 整个系统的熵也是增加的。高温物体的熵的增量

$$\Delta s_1 = \int \frac{dq_1}{T_1}$$

因为对高温物体而言是放热, dq_1 为负, 则 Δs_1 为负。低温物体的熵的增量

$$\Delta s_2 = \int \frac{dq_2}{T_2}$$