

航空燃气涡轮发动机

尚义
编著

航空工业出版社

航空燃气涡轮发动机

尚 义 编著

航空工业出版社

1995

内 容 提 要

本书阐述了航空燃气涡轮发动机热力气动基础、发动机各部件知识、单轴涡轮喷气发动机总体参数和性能，并介绍了涡扇、涡轴与涡桨发动机的工作特点和总体性能，以及航空燃气轮机改为地面动力装置的实用价值和前景。

本书可作为航空院校与动力有关的各专业（非发动机设计专业）的教材，也可用作各类航空工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

航空燃气涡轮发动机/尚义编著. —北京: 航空工业出版社, 1995.8

ISBN 7-80046-894-1

I. 航… II. 尚… III. 燃气轮机: 航空发动机-涡轮喷气发动机 IV. V235.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 01273 号

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

煤炭工业出版社印刷厂印刷 全国各地新华书店经售

1995年8月第1版 1995年8月第1次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 13.5 字数: 334千字

印数: 1—2500 定价: 10.00元

前 言

本书系根据航空高等院校发动机课程（非发动机设计专业）教学大纲编写的。本书共分九章。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。第二章介绍航空燃气涡轮发动机的工作原理。第三章阐述发动机各部件知识，包括结构和原理。第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。第五章介绍总体结构特点和发动机各附件系统。第六、七、八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。第九章介绍航空燃气涡轮发动机改为地面动力装置的实用价值和前景。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。

希望通过对本教材的学习，能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，对各部件的作用原理和结构特点也有一般的了解。

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

本教材适用于航空类与动力有关的各专业（非发动机设计专业）的学生，如飞行器、发动机自动器、测试、航空维修等专业。也可用作各类航空专业工程技术人员的参考书。

本书由西北工业大学陈辅群教授主审。南京航空航天大学王琴芳和史志达副教授对全书进行了校核并提出了宝贵意见，在此一并致谢。

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，欢迎读者批评指正。

作 者

1995年1月于南航

主 要 符 号

A	面积	Q_0	燃油完全燃烧时的放热量
c	比热容; 音速	Q_p	定压加热量
c_p	空气的定压比热容	Q_v	定容加热量
c'_p	燃气的定压比热容	Q_{vf}	燃烧室火焰筒容热强度
c_v	空气的定容比热容	q	动压头
D	直径	$q_1 (q)$	对单位工质的加热量
\bar{d}	轮毂比	q_2	单位工质的放热量
F	推力	q_0	一千克燃油完全燃烧时的放热量
F_A	单位迎面推力	q_m	工质或空气的质量流量
F_{eff}	有效推力	q_{mf}	燃油的质量流量
F_{in}	发动机内部的作用力	q_{mg}	燃气的质量流量
F_{out}	发动机短舱外部的作用力	q_p	对单位工质的定压加热量
F_s	单位推力	q_v	对单位工质的定容加热量; 容积流量
F_W	推重比	R	空气的气体常数
f	油气比	R'	燃气的气体常数
H	飞行高度	Re	雷诺数
H_u	燃油的低热值	r	半径
h	单位工质的焓	s	单位工质的熵
i	迎角	sfc	单位燃油消耗率
i_r	减速比	T	温度
K	用气动函数计算流量时的空气常数	u	单位工质的内能; 圆周速度
K'	用气动函数计算流量时的燃气常数	V_f	燃烧室火焰筒容积
l_0	一千克燃油完全燃烧时所需要的理论空气量	v	速度; 比容
M	力矩; 马赫数	W	重量; 单位工质对外所做的功
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_{Te}	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_0	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_a	附加阻力
$Q_1 (Q)$	实际放热量	x_f	摩擦阻力
		Y	内外涵道的流量参数, 简称涵

道比

α 余气系数；叶栅中气流绝对速度与额线的夹角；喷雾锥角

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

β_K 叶栅结构角

δ 落后角；径向间隙

Δ 轴向间隙

η 效率

η_b 完全燃烧效率

η_m 机械效率

η_p 推进效率

η_i 热效率

η_0 总效率

γ 空气的比热比

γ' 燃气的比热比

λ 速度系数

μ 离心叶轮的功率系数

φ 进气道流量系数；桨距角

ρ 工质的密度

σ 总压恢复系数

π 增压比或落压比

θ 加温比；叶片的弯折角；角位移；燃烧效率的相似准则数

下 标

a 轴向

ad 等熵

af 复燃加力

b 燃烧室

cor 换算参数

cr 临界参数

d 设计点参数

dx 涡轮导向器

e 喷管

ea 喷管临界截面后

eb 喷管临界截面前

eq 当量参数

f 燃油

g 燃气

H 高压部件

h 叶根

i 进气道

in 内部

K 压气机

L 低压部件

m 平均；测量截面

n 多变过程

p 螺旋桨

R 转子

r 旋翼；回热

S 静子

sk 激波

st 起动

T 涡轮

T' 温度

t 叶尖

u 切向

*

I 内涵道

II 外涵道

0 远前方未扰动气流参数；地面台架参数

01 进气道进口

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

1.1 高压压气机进口

2 压气机出口；叶栅出口；热力过程的终了状态；自由涡轮

3 涡轮进口；静止叶栅出口

3.1 低压涡轮进口

4 涡轮出口

5 混合器进口

6 加力燃烧室进口

7 喷管进口

8 喷管喉道

9 喷管出口

目 录

主要符号

结论	(1)
第一章 燃气涡轮发动机热力气动基础	(3)
第一节 热力学第一定律	(3)
一、理想气体的状态方程式	(3)
二、比热容和热量	(3)
三、工质的内能	(4)
四、外功	(5)
五、工质的焓	(5)
六、热力学第一定律	(6)
七、热力过程	(6)
第二节 热力学第二定律	(9)
一、气体工质的熵	(9)
二、热力学第二定律	(10)
三、 $T-s$ 图和 $h-s$ 图	(11)
四、循环和循环效率	(13)
第三节 气体动力学的基本方程	(14)
一、连续方程	(15)
二、能量方程	(15)
三、伯努利方程	(16)
四、音速和马赫数	(17)
五、气流的滞止参数和气动函数	(17)
六、动量方程	(19)
七、动量矩方程	(20)
八、膨胀波和激波	(20)
第二章 燃气涡轮发动机的工作原理	(23)
第一节 涡轮喷气发动机热力循环	(23)
一、理想循环	(23)
二、实际循环	(24)
第二节 推力的产生	(26)
一、推进功率和推进效率	(28)
二、总效率	(29)
三、沿流程参数变化	(29)
四、推力在各部件上的分配和传递	(30)

第三节 涡轮喷气发动机的性能指标和基本要求	(30)
✓一、性能指标	(30)
✓二、基本要求	(33)
✓三、发展方向	(35)
四、发动机与飞机一体化设计的概念	(37)
第四节 涡轮喷气发动机的演变	(38)
一、加力式涡轮喷气发动机	(39)
二、冲压式喷气发动机	(39)
三、涡轮风扇喷气发动机	(40)
四、加力式涡轮风扇喷气发动机	(42)
五、涡轮螺桨发动机	(43)
六、涡轮轴发动机	(44)
七、可变循环喷气发动机	(44)
第三章 涡轮喷气发动机部件	(47)
✓第一节 进气道	(47)
一、亚音速进气道	(48)
✓二、超音速进气道	(50)
✓第二节 压气机	(53)
一、压气机类型和结构	(53)
二、基本方程式	(59)
三、轴流式压气机	(64)
✕四、离心式压气机	(71)
五、压气机特性	(73)
✓第三节 燃烧室	(82)
✓一、基本性能要求	(82)
✕二、燃烧室结构形式	(84)
✓三、燃烧室工作过程和主要零组件	(88)
✓四、燃烧室特性	(92)
第四节 涡轮	(94)
一、结构形式	(94)
✓二、工作原理	(97)
✓三、涡轮特性	(99)
第五节 加力燃烧室	(99)
一、基本性能要求	(100)
二、加力燃烧室工作过程和主要零组件	(101)
第六节 喷管	(102)
✓一、工作原理	(102)
二、结构形式	(105)
第四章 涡轮喷气发动机	(110)

第一节 各部件的共同工作	(110)
一、共同工作的条件	(110)
二、调节规律的讨论	(113)
三、共同工作线	(115)
第二节 发动机特性	(118)
一、转速特性	(118)
二、速度特性	(120)
三、高度特性	(125)
四、过渡状态特性	(127)
第三节 发动机通用特性和台架性能换算	(130)
一、发动机相似工作条件	(130)
二、发动机的通用特性	(131)
三、台架性能换算	(132)
第四节 双轴涡轮喷气发动机	(133)
一、双轴涡轮喷气发动机的工作特点	(134)
二、双轴涡轮喷气发动机的共同工作	(135)
三、双轴涡轮喷气发动机的调节规律和特性	(137)
第五节 加力涡轮喷气发动机	(139)
一、加力的工作特点	(139)
二、加力涡轮喷气发动机的调节规律和特性	(141)
三、喷液加力	(143)
第五章 涡轮喷气发动机总体结构和附件系统	(145)
第一节 总体结构	(145)
一、转子承力方案	(145)
二、静子承力系统	(146)
第二节 燃油系统	(146)
一、主燃油泵的工作	(148)
二、加力燃油泵的工作	(150)
第三节 起动系统	(152)
一、地面开车	(152)
二、空中起动	(153)
第四节 滑油系统	(153)
第六章 涡轮风扇喷气发动机	(155)
第一节 基本工作原理和性能特点	(155)
一、基本工作原理	(155)
二、主要的过程参数	(156)
三、不加力涡轮风扇喷气发动机的特点	(157)
四、加力涡轮风扇喷气发动机的特点	(158)
第二节 部件特点	(159)

一、风扇	(159)
二、压气机	(160)
三、燃烧室	(160)
四、涡轮	(160)
五、混合器	(161)
六、加力燃烧室	(162)
第三节 各部件的共同工作和调节规律	(162)
一、各部件的共同工作方程	(162)
二、调节规律	(166)
第四节 涡轮风扇喷气发动机特性	(167)
一、速度特性	(167)
二、高度特性	(168)
三、转速特性	(168)
第七章 涡轮轴发动机	(170)
第一节 基本工作原理和主要参数	(171)
一、自由涡轮式和定轴式涡轮轴发动机	(171)
二、主要参数	(172)
第二节 部件特点	(173)
一、进气装置	(173)
二、压气机	(174)
三、燃烧室	(174)
四、涡轮	(175)
五、排气喷管	(175)
六、减速器	(175)
第三节 各部件的共同工作和调节规律	(176)
一、各部件的共同工作方程	(176)
二、调节规律	(178)
第四节 涡轮轴发动机特性	(180)
一、转速特性	(180)
二、高度特性	(182)
三、速度特性	(182)
第八章 涡轮螺桨发动机	(185)
第一节 基本工作原理和参数	(185)
一、性能参数	(186)
二、过程参数	(188)
第二节 各部件的共同工作和调节规律	(188)
一、各部件的共同工作方程	(188)
二、调节规律	(190)
第三节 涡轮螺桨发动机特性	(190)

一、节流特性·····	(190)
二、速度特性·····	(192)
三、高度特性·····	(193)
第四节 涡轮螺桨发动机发展中的问题·····	(193)
一、当前使用的涡轮螺桨发动机·····	(193)
二、螺桨风扇发动机·····	(194)
三、带回热装置的涡轮螺桨发动机·····	(195)
第九章 非航空用燃气涡轮发动机·····	(197)
第一节 燃气涡轮发动机的应用领域·····	(197)
第二节 工作原理和主要参数·····	(198)
第三节 使用特点·····	(199)
一、对进气装置的要求·····	(199)
二、能使用多种燃料·····	(200)
三、可靠性和维护性·····	(200)
第四节 燃气轮机的派生循环·····	(201)
一、提高热能的利用率·····	(201)
二、应用固体燃料的前景·····	(202)
参考文献·····	(204)

绪 论

自从1903年莱特兄弟第一架飞机问世以来，航空技术经过几十年的发展，取得了巨大的成就。为了满足各个时期提出的不同的军用或民用要求，飞机的性能相应地不断提高。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，尽管不同类型的飞机有不同的要求，但航空飞行器作为一个整体，各类飞机的发展是相互促进的，在技术上是相互借鉴和紧密联系的。应当指出，在它们之中，歼击机在许多技术领域处于领先地位，这与对歼击机的作战要求是相适应的。因此，在航空技术的发展中，歼击机是技术更新最快的机种。显然，一架二三十年前设计投产的民航机，虽然性能较差，但今天仍有可能在航线上使用，甚至继续生产；但一架同期设计投产的歼击机，今天再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的。

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。

第二次世界大战爆发前后，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，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1400kW，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750~800km/h。但是，这种动力装置在继续发展中受到了限制，满足不了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。

第二次世界大战期间，各主要交战国都迫切地希望在航空技术上有所突破，特别希望在航空动力装置方面处于领先地位，因而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。第二次世界大战后，美苏两国在自己研制的基础上引进了专利，并从德国获得了战利品，很快就从仿制过渡到了自行研制。

涡轮喷气发动机具有功率大、重量轻的特点，它出现后不久，飞机的速度就突破了“音障”，随后又出现了二倍甚至三倍音速的飞机；在飞行高度上，飞机的静升限达10000m、20000m甚至30000m。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，涡轮喷气发动机的出现是在活塞式发动机发展到相当完善的程度之后，其中重要的原因，是技术上的可能性，因为直到30年代末期，才具备发展涡轮喷气发动机的条件。这主要体现在以下三个方面：一是设计与试验技术都有了新的进展或突破，例如航空活塞发动机发展废气涡轮增压器的设计试验，为涡轮喷气发动机的主要部件压气机和涡轮的研制，提供了借鉴；二是出现了耐高温的合金材料；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。其中以耐高温材料的出现最为主要，它使高温高压燃气流经涡轮做功后，尚有剩余可用能量在喷管内膨胀加速使发动机产生反作用推力。

当前，涡轮喷气发动机发展了大半个世纪，是否也到了与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？

类似的问题，在50年代后期曾经提出过，当时曾有人认为涡轮喷气发动机的发展快到尽头了。究其原因，一是错误地认为原子弹和导弹的迅速发展使飞机在战争中已退居次要的地位，二是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。但不久就发现导弹代替不了飞机，而且当时作战飞机对飞行速度的要求，还到不了需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20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，飞机的性能提高到了新的水平。

直到今天，我们仍然可以肯定地说，航空燃气涡轮发动机，无论是作战飞机上用的带加力的涡轮风扇喷气发动机，还是民航机或军用运输机上用的涡轮风扇喷气发动机乃至涡轮螺旋桨发动机，或是直升机上用的涡轮轴发动机，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。又如当今出现的带矢量喷管的发动机，不但能使飞行器的机翼和尾翼上的控制面简化，而且能使飞行器的飞行姿态快速变化，从而大大提高飞行器的机动性。

根据以上分析，我们可以明确地说，今天的航空燃气涡轮发动机虽然已经发展了大半个世纪，但还远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，将在后面的章节中予以介绍。

第一章 燃气涡轮发动机热力气动基础

燃气涡轮发动机（简称燃气轮机）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的，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燃气轮机的工作原理、性能及其发展状况，有必要对上述内容作概括介绍。

第一节 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，以致可以忽略不计；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，每千克气体的容积， m^3/kg ；

T ——气体绝对温度， K ；

R ——气体常数， $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ；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、比热容和热量

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 ——比热容， $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ 。

比热容的定义是：使1kg工质温度升高1℃时所需要吸收的热量。

比热容并非常数，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 表示定容比热容；后者叫定压加热，用 c_P 表示定压比热容。

工质一定，定容比热容和定压比热容都是温度的函数，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。

因为比热容是温度的函数，所以热量计算公式可表示为：

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

式中： $c \int_{T_1}^{T_2}$ ——工质温度在 T_1 到 T_2 范围内的平均比热容， $J/kg \cdot K$ 。

在热力气动中经常用到的参数是比热容比

$$\gamma = c_P / c_V \quad (1-4)$$

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

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

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1kg气体质量加热，温度从 T_1 到 T_2 ，加热量为

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

式中： c_V ——平均定容比热容。

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，但在其他热力过程中，无疑也同样是适用的。

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，实际上也都是对一些相对数值。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，1kg工质容积膨胀 dv ，对外所做的功可表示为

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

容积膨胀从 v_1 到 v_2 ，单位工质对外所做功可表示为上式的积分：

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

如压力 p 不变，则得

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

如容积 v 不变，则得

$$W = 0$$

外功有正负之分，通常取定工质对外界所做功为正，外界对工质所做功为负。

五、工质的焓

焓的定义，可按公式表示为

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

式中： u ——内能， pv 可看作压力势能。

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1kg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 ——平均定压比热容。

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，还对外做了功，公式(1-12)还可表示为

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

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

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

$$\Delta h = q = \Delta W + \Delta u$$

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 和气体膨胀对外所做的功 $p dv$ 。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

$$h = u + p v$$

则得解析式的另一种形式

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

积分上式，得

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

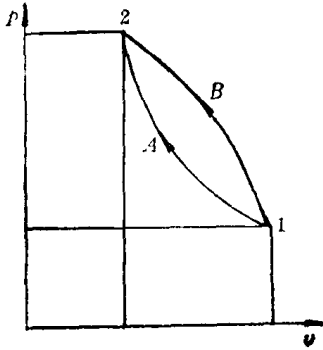


图 1-1 $p-v$ 图上任意过程的表示

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。与此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。

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。

过程方程可表示为

$$v = \text{常数}$$

气体状态参数间的关系可表示为

$$p_2/p_1 = T_2/T_1$$

能量转换关系

$$W = 0$$

则

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