

柴油机

(原理 构造 使用 维修 故障分析)

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书较系统、全面地介绍常用的各种国产及引进的柴油机。在阐明原理的基础上，对它们构造上的共性和特点作了必要的归纳对比，分析了新技术、新工艺的发展方向；详细叙述了使用、维修、故障分析的具体经验；列出了计算、调整、试验用的技术数据和公式。

本书主要供机电技术干部、柴油机司机、工人使用，也可作为柴油机设计人员、院校内燃机专业师生的参考读物。

柴 油 机

(原理 构造 使用 维修 故障分析)

马 守 明 编

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路16号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本787×1092¹/₁₆

印张26³/₄

字数 642 千字

印数1—14,100

1981年12月第1版

1981年12月第1次印刷

书号15035·2431 定价3.00元

前 言

在地质勘探部门，柴油机广泛地作为普查、物探、钻探、发电、压风机、拖拉机、载重汽车、运输船只、供水等设备的动力。常用的国产柴油机按气缸直径目前可分为90、95、105、110、115、120、125、135、146、160十种。近几年来，又有不少与引进设备配套的国外柴油机在这些部门使用，如日本三菱公司的6DB1系列、英国的PERKINS6-354型柴油机、东德的8NVD36A-1型增压柴油机等。柴油机所以在地质勘探部门得到广泛采用，主要是因为它的动力供应不受野外条件的限制，而且比汽油机经济得多。其主要缺点是原理、构造较难确切掌握，使用维修不易恰到好处。

当前，增压技术、新型喷油泵及各种新型调速器、功率较大的二冲程柴油机、新型燃烧室、油冷及组合活塞、硅整流电气系统、新型扭转减震器等新技术和制造上的辊锻、液态模锻成型、低温液体氮化、喷钼等新工艺正在逐步推广，柴油机性能不断被改善。新技术、新工艺的采用更要求在确切掌握原理、构造的基础上，进一步提高使用维修水平，充分发挥柴油机的效能。

为了帮助读者对柴油机技术从理论到实践有比较全面的了解，根据地质勘探部门常用的柴油机的特点，以及近几年来新技术、新工艺的发展情况编写了本书。

本书第一、二章以基本原理为主，概括了最基本的理论研究成果，比较系统地建立了对柴油机工作过程必须具有的理性认识，分析了各类燃烧室的优缺点。

第三章对柴油机的核心部分——燃油供给及调速系统作了比较系统而详细的阐述，并对引进设备中常见的RSVD、RAD、RSV、RFD型调速器作了分析。

第四章至第九章对柴油机曲柄连杆机构受力情况、各种起动系统、各类润滑系统、风及水冷冷却系统、柴油机的特性及试验，按工作系统和试验要求进行阐述。

有关原理、结构、使用、调试、维修、故障分析均纳入有关章节分别叙述。

各章节中均附有常用的计算、调整、试验用的技术数据和公式。在各有关章节中也对新技术、新工艺的发展作了综合性的阐明。对于常用的柴油机起动用汽油机、也分别按原理、构造、性能插入有关章节作了说明；并将一般汽油机和柴油机的性能作了扼要的对比。

目 录

第一章 工程热力学的有关概念	1
第一节 理想气体及理想气体状态方程式	1
第二节 热力学第一定律	4
第三节 热力循环及卡诺循环	8
第四节 热力学第二定律	12
第二章 柴油机原理	15
第一节 柴油机基本结构	15
第二节 柴油机的结构参数	19
第三节 柴油机的理论循环	19
第四节 柴油机的实际工作过程	26
第三章 柴油机供给系统	62
第一节 柴油机供给系统的主要组成部分	64
第二节 调速器	96
第三节 喷油泵总成的试验和调整	125
第四节 喷油泵在柴油机上供油提前角的调整	140
第五节 分配式喷油泵	150
第六节 燃油系统的发展方向	157
第七节 空气供给及废气排除	159
第四章 机体与曲柄连杆机构	185
第一节 概述	185
第二节 曲柄连杆机构的运动和受力	186
第三节 单缸四冲程柴油机的惯性力及其平衡	190
第四节 多缸四冲程柴油机的惯性力及其平衡	193
第五节 气缸体和曲轴箱	196
第六节 气缸套	204
第七节 气缸盖与气缸垫	221
第八节 活塞连杆组	232
第九节 曲轴-飞轮组	265
第五章 柴油机起动系统	290
第一节 柴油机起动系统辅助设施	290
第二节 人力起动	293
第三节 电动机起动	294
第四节 汽油机起动	332
第五节 柴油机换烧汽油起动	361
第六节 压缩空气起动	361
第六章 润滑系统	366
第一节 润滑系统的功用	366
第二节 润滑系统的基本问题	366

第三节	润滑系统类别	369
第四节	润滑系统主要机件	373
第五节	润滑系统常见故障及修理	382
第七章	冷却系统	385
第一节	风冷系	385
第二节	水冷系	387
第八章	离合器	399
第一节	离合器的功用和种类	399
第二节	767型离合器的构造、使用及调整	399
第三节	L-36离合器	402
第九章	柴油机的试验和特性等问题	404
第一节	柴油机的型号组成及含意	404
第二节	柴油机功率的标定	405
第三节	零件的磨损特性及柴油机修理类别	406
第四节	柴油机的试验	407
第五节	测功器	410
第六节	柴油机特性	416

第一章 工程热力学的有关概念

热力学研究的范畴是热能和机械能、热能和化学能以及热能和电磁能之间的转换规律。而工程热力学的基本任务是研究热变为机械能的过程,并寻求热变为功的最有利条件。

柴油机中燃料化学能变为机械能的过程非常复杂,我们把实际过程加以简化,在尽量符合实际过程特点的情况下,抽象出理论过程,以便掌握柴油机热工转换的主要矛盾,分析柴油机工作过程实质,以及影响动力性和经济性的主要因素。这就需要了解工程热力学的有关概念,以提高对柴油机工作过程的理性认识。

第一节 理想气体及理想气体状态方程式

一切物体都是由大量的分子所构成的,气体也不例外。与液体相比,气体分子密度大约比液体小一千倍。

假定有一种最简单的气体模型,它符合以下假设:

- (1) 每一种单纯的气体,都是由许多大小和质量相等,性质相同的分子构成。
- (2) 气体分子运动不息,速度无定向,大小也不等。但在任何时刻,沿任一方向运动的分子个数与沿另一方向运动的分子个数相等。
- (3) 气体中各分子间的距离远大于分子本身,分子仅为极微小的质点。因此,除了碰撞时外,分子与分子或分子与器壁的相互引力作用力都很小,可以不计。故理想气体的内能没有位能,只有动能。
- (4) 分子除互相碰撞或与容器的碰撞外,总是作直线运动,在碰撞时好象一个具有完全弹性的球,并无动能损失。

符合这种气体模型的气体叫理想气体。

实际上,理想气体是不存在的。但由于理想气体的模型最简单,通过对实际气体的实验以及根据建立在理想气体基础上分子运动学说的数学推导,可以比较简单地找到在一定状态下理想气体压力、体积、温度三个基本状态参数之间的普遍规律。

难以液化的许多气体,距离液态相差越远时,越接近于理想气体。在柴油机工作压力和范围内的实际气体如:燃气、空气、氧、氮、氢、一氧化碳、二氧化碳等都可以看作是理想气体的近似。

一、理想气体的状态方程式

对G公斤某种理想气体,其压力P、体积V和温度T之间有如下普遍规律:

$$PV = GRT$$

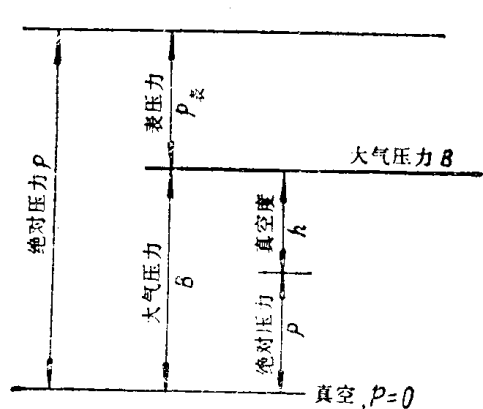
这就是理想气体的状态方程式。对这个公式的应用,要注意以下几点:

(1) 气体的基本状态参数:气体的压力(指容器器壁受到的单位面积压力)、容积和温度是能用仪表直接测量的物理量,称为气体的基本状态参数。

①压力:是大量气体分子运动时与器壁碰撞的平均结果,气体分子运动愈快,撞击器壁愈有力,在单位时间内碰撞的次数也愈多,因而压力也愈大。

常用的单位是工程大气压：1 工程大气压 = 1 公斤/厘米²(kg/cm²) = 10000 公斤/米²，工程上常用弹簧压力表来测量压力，测出的数值为表压力 ($P_{\text{表}}$)；如果气体压力低于大气压力，可用真空表测量，测出数值为真空度 (h)；大气压力 (B) 可用气压计测出。

在气体状态方程式中用的 P 是指绝对压力，它与表压力、真空度和大气压力的关系如图 1-1。



$$P = P_{\text{表}} + B$$

$$P = B - h$$

②温度：是理想气体内部分子平均动能的综合表现，是影响理想气体内能的唯一因素。

国际上规定，在一个标准大气压下（相当于 760 毫米水银柱，或 1.0332 公斤/厘米² 工程大气压）取纯水的冰点为 0 度，沸点为 100 度，这种温度标准称为摄氏温标，并用 t 代表其读数（以 $t^{\circ}\text{C}$ 表示）。

在理想气体状态方程式中的 T ，是用的绝对温标，以理想气体分子热运动处于停止状态为绝对温标的 0 度，并以摄氏温标刻度的大小确定其温标。

绝对温标的 0 度就是摄氏 0 度以下 273 度，它是冷的最高和最后的程度。按绝对温标计算的温度叫绝对温度（以 $T^{\circ}\text{K}$ 表示）。两种温标中每度的量是相等的。

两者的关系如下： $T = t + 273$

绝对零度在地球上是不存在的，目前只能达到绝对零度以上百分之几度的温度。

③体积的单位取米³ (M^3)。

(2) R 叫气体常数。对一定性质的气体来说 R 是一个常数；对按一定比例混合的气体，其 R 也是一个常数。

(3) 理想气体只有处于均衡状态，即在气体所占容积中每一点的温度、压力都是一样，即处在热力平衡和机械平衡中，气体状态方程式才是正确的。显然气体的均衡状态只有在气体内外温度压力相等时才能实现。例如外界压力的减低不可避免的引起气体的膨胀和压力的减低，直到内外压力相等气体达到新的均衡状态为止。在这以前，气体要经过一系列不均衡状态，这需要相当时间，因为把气体外表面压力的改变传给所有气体是有一定速度的。

(4) 如果以纵横座标画出 P - V 图，由于 $PV = GRT$ ，只要 P 一定， T 就一定，故气体的每一个平衡状态，可以由一个确定的点来标定。对于任何非均衡状态的气体在 P - V 图上就不能用一个确定的点来表示，只能用状态参数的平均值，近似地予以描绘。

二、可逆过程和不可逆过程

研究柴油机的热力过程，常以气缸头底面、气缸套内壁和活塞顶面作为边界，把它们所包围的气体作为热力体系。一个热力体系如果仅有能量的传递，叫封闭体系；如果同时有气体交换叫开口体系。理想气体的状态方程式也只适用于封闭体系。

一个体系从状态 A 经过一系列中间状态 ($CDE \cdots LMN$) 而变到 B (图 1-2)，就是一个热力过程。既然状态方程式只对气体是均衡状态时才是正确的，则当它应用于整个热力过程时，这个过程必须由连续的均衡状态所组成。要办到这一点，只有在外界物体的温度

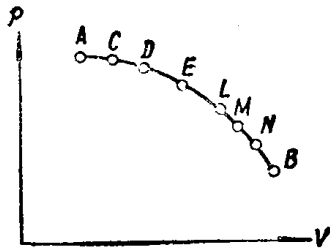


图 1-2 热力过程

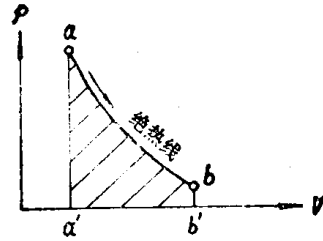


图 1-3 可逆绝热膨胀过程

和压力改变得很慢，使在任何时刻外界和气体以及气体内部的温度及压力差都极小，只有在这种条件下，热力过程可以认为是连续的均衡状态，可以在整个过程中应用状态方程式，也才可能在P-V图上用点来表示状态，用实线来表示过程，也叫热力过程曲线。

可逆过程是指过程可以向反方向进行，并且参加过程的气体 and 外界都能按照相反的顺序经过原来的各状态，而气体和外界都没有受到任何的改变，都回到了开始状态。

例如如图1-3，有一可逆绝热（与外界不发生热交换）的膨胀过程ab。曲线ab的座标所给出的不仅是气体压力的值，而且也是外界压力的值。假如气体到达b点状态后再按曲线ba提高外界压力，则气体完成逆过程，而被绝热压缩到开始状态a点，同时压缩时所消耗的功必须等于原来膨胀时所产生的功。

可以看出，可逆过程的条件是：

(1) 热力体系在全过程始终保持均衡状态是可逆过程的必要条件

不能保证始终是均衡状态的过程是不可逆的。也就是说，这种过程或者是实际中不可能实现的（如等温、等压、等容、绝热过程），或者是逆过程的进行是发生在与前不同的参数下。总之，在上述任一情况下，这种逆过程是不能使气体和外界恢复到原来状态。

气体的压力和外界压力有显著差别时，就是不可逆的过程。因为全过程不能始终保持均衡状态。可用一例说明：假定有两个相等容积V的容器，由带有活门的管子相连（图1-4），左边盛有压力 p_1 ，温度 t_1 的气体，右面的为完全真空，故压力为零。活门打开时，气体急速地膨胀，以极大的速度由左边流向右边容器，直到两个容器中压力一致为止。流动时发生的严重的骚乱运动经过一段时间便消失了，而在容器中的气体达到新的平衡状态。再要气体由右容器回到左容器，不消耗外界压缩功是不可能的。而在正过程中，因为气体是流到没有压力的空间，所以也没有做出任何外功。可见这个过程是不可逆的，而不可逆过程是与外功的损失相联系的。

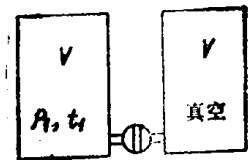


图 1-4 气体压力差显著时，不可逆过程之试验

气体的温度与外界的温度有明显差别时，也是不可逆过程。假如在正过程中，气体把热交给温度显著低于气体温度的外界，则在逆过程中须自外界吸入热。而这只有在外界温度最少提高到略大于气体的温度时才可能，所以也是不可逆过程。

既然是个热力过程，那么过程中的每一状态又不能是完全固定的均衡状态。每一个状态，必须由一个无限小的影响，过渡到无限邻近的另一个状态，这样才能满足热力体系在全过程始终保持均衡状态。这一系列均衡状态之取得，必须是在变化相当慢的似静状态中进行。

(2) 整个过程中没有摩擦损失

假如在正过程为膨胀时，功消耗于摩擦而变为热，则在逆过程压缩时，也同样要消耗功于摩擦、外界在过程终了时就不能恢复到原状态，而需要消耗功，这是不可逆过程的特点。

可逆过程是理想过程。地球上一切实际过程都是不可逆的。但是由于只有可逆过程才能用 P-V 图上的曲线和面积来准确地描绘其过程，只有可逆过程才能用简单的理想气体状态方程式进行热力计算，所以工程热力学中许多实际过程，往往先加以简化，在尽量符合实际过程的特点下，抽象为可逆过程进行处理。当实际过程与可逆过程的结论偏差很小时，研究可逆过程就比直接研究实际过程简单的多。当然，如果不可逆性严重改变了可逆过程的特性，则应另作考虑。

实践证明，测定柴油机实际热力过程的结果，与研究可逆过程得出的结果偏差很小，因此，对可逆过程的研究，有其极重要的意义。

第二节 热力学第一定律

热力学第一定律指出：热能和机械能可以互相转换，转换前后的总能量守恒。

热力学第一定律用于研究柴油机时常用的二种数学表达式：

一、热力学第一定律的热功当量表达式

$$Q = AL$$

式中 Q——转变为功的热量，千卡 (kcal)；

L——消耗热量 Q 所得到的功，公斤·米 (kg·m)；

A——比例常数，等于 $\frac{1}{427}$ 千卡/公斤·米 (kcal/kg·m)

A 的含意是：消耗 427 公斤·米的功就产生一千卡的热量。A 也叫热功当量。

应用以上公式时应注意以下各点：

(1) $Q = AL$ 的表达式，应理解为热和功互为当量并且可按比例从一种能量转变为另一种能量，是能量守恒和转换定律用在功转换为热量时的表达形式，这与体系是封闭的或开口的，过程是可逆的或不可逆的无关。第一定律指出，功必须在消耗热的代价下才能得到。

(2) 千卡的含意。热量的单位是卡，现在规定一卡的热量为—公斤水由 19.5℃ 加热到 20.5℃ 所需的热量。这数值与在 0~100℃ 温度范围的平均值几乎相同，也就是说—卡就是一公斤水由 0℃ 加热到 100℃ 所需热量的百分之一。—千卡就叫千卡。

(3) 功与功率。(kg·m) 是功的单位，但在工程上应用时嫌它太小，所以在动力机中功的单位用“马力小时”。但功不能说明机器作功能力的大小，为此，把机器每秒作的功叫功率，用功率来比较机器作功能力的大小。

$$1 \text{ 马力 (HP)} = 75 \text{ 公斤·米/秒}$$

$$1 \text{ 马力小时} = 75 \times 60 \times 60 = 270000 \text{ 公斤·米}$$

$$1 \text{ 马力小时} = \frac{270000}{427} = 632 \text{ 千卡}$$

在电力设备中，电能的单位用“千瓦小时”，功率的单位是“千瓦” (kW)。

$$1 \text{ 千瓦} = 102 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{秒} = 1.36 \text{ 马力}$$

$$1 \text{ 千瓦小时} = \frac{762000}{427} = 860 \text{ 千卡}$$

二、热力学第一定律的分析式

$$dQ = du + APdv \quad (\text{或 } Q = \Delta u + AL)$$

在研究柴油机中常用这一表达式，其含意应理解为：在一封闭体系的可逆过程中，体系在过程中吸入（或放出）的热量，应等于体系内能的变化和过程中体系对外所作的功（或接受的外功）。这一表达式反映了在可逆的热力过程中热变为功的基本关系。

在应用上面的分析式时应注意以下几点：

(1) dQ 表示从气体中取出的微小热量或加给气体的微小热量。

如加热给气体 $dQ > 0$ ，如从气体取出热量 $dQ < 0$ ， dQ 的单位为千卡。

$\int dQ$ 表示在有限的热力过程中，从状态 1 到状态 2 时，加给或取出体系的热量。正负号和单位与 dQ 的表示方法相同。

(2) du 及 $\int du$ 的单位为千卡，表示体系内能的变化量。对理想气体而言，体系内能仅有动能，即内能仅与温度状态有关，故体系内能的变化，完全与物体的初态和终态的温度有关，而与中间状态无关。即 $\int du = u_2 - u_1$ 。

内能增加时取正号，减少时取负号。

(3) Pdv 的含意（见图 1-5）

气体膨胀时 $dv > 0$ ， P 为绝对压力，永远是正数，故 $Pdv > 0$ ，表示气体对外界做功，称为正功。

气体受压缩时 $dv < 0$ ， $Pdv < 0$ ，即由外界消耗了功，压缩气体，称为负功。

对柴油机讲，如果缸内气体体积有了微小的增加 dv 、使活塞移动很小的距离 ds 而达到虚线位置，则 $dv = F \cdot ds$ 。式中 F 为活塞面积或气缸面积。显然，只有气体作用在活塞上的总压力 $P = p \cdot F$ 作了功，按力学定律这功的大小：

$$dL = P \cdot ds = pF \cdot ds = Pdv$$

这个公式的含意是气体体积增加或减少 dv 时，其膨胀功为 Pdv ，它可以是正值也可以是负值。在可逆过程中膨胀功即为外功。

如果气体在气缸内体积由 V_1 变为 V_2 时，则其膨胀功可在相应的界限内积分上述方程式：

$$L = \int_{V_1}^{V_2} Pdv$$

可看出，既然在通常情况下 P 是变数，积分以求得功只有在已知变数 P 和 V 之间的函数关系时，即已知压力和容积如何同时变化时才可能假设这样的函数关系为已知，例如 $P = F(V)$ ，则功可求得：

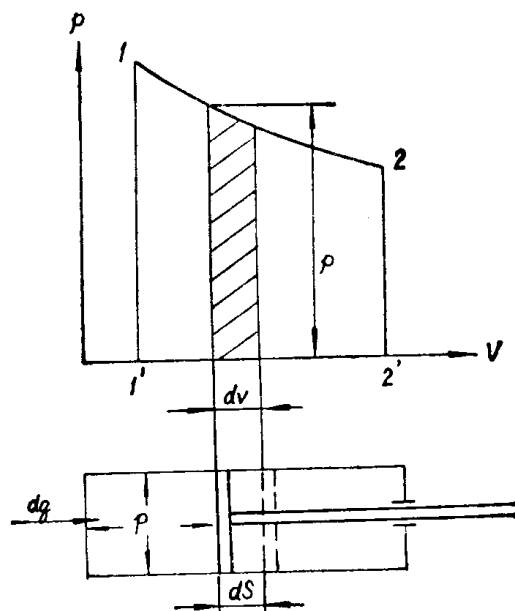


图 1-5 P-V图曲线下面积含意

$$L = \int_{V_1}^{V_2} P dv = \int_{V_1}^{V_2} F(v) dv$$

只要找出函数 $P = F(V)$ ，以 V 为变数，在界限范围 V_1 及 V_2 间的积分就可求解，而且只有一个值。

理想气体在一系列均衡状态下进行热力过程时，就可以用简单的办法求得 $P = F(V)$ 的关系。

对一般的热力过程我们并不感兴趣，在柴油机热力过程中起着重要作用的是下列特殊过程，见图1-6。

①定容过程 热力过程中 $V = C$ 、即容积始终不变。

从气体状态方程式可看出，当全过程是连续的均衡过程时，任一点的状态可用 $P = \frac{GRT}{V}$

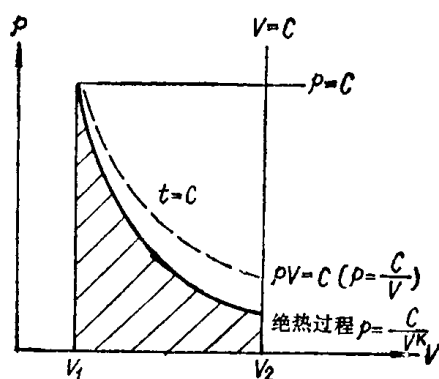


图 1-6 几种特殊热力过程的P-V图

表示，即在P-V图上 $V = C$ 的直线上，有一个 P 就有一个对应的 T 。此直线上任一点的状态参数均可确定，此直线代表的热力过程也可确定，即在此热力过程中 $P = F(V)$ 的关系，可用一条平行于纵座标 P 的直线表示。

如果不是理想气体，或过程又不是连续的均衡状态，虽然体积始终不变，此直线不能代表热力过程中 $P = F(V)$ 的关系，因为即使在P-V图上画上了一点，定下了 P ，温度仍不能确定，即过程中各点气体状态确定不下来， $V = C$ 的直线就不能用来准确地描述其热力过程， $P = F(V)$ 的关系就定不下来。

②定压过程 在热力过程中，压力始终不变。对理想气体的连续均衡过程，可在P-V图上用一条平行于横座标 V 的直线 $P = C$ 来表示热力过程，该线就表示了过程中 $P = F(V)$ 的关系。

③等温过程 在热力过程中体系温度始终保持不变（不是与外界没有热交换）。由 $PV = GRT$ 可知 $PV = C$ ，可用一条等轴双曲线来表示 $P = F(V)$ 的关系。此曲线也表示了体系在过程中各点的状态。

④绝热过程 在热力过程中，气体体系与外界没有热交换（不是温度没有变化），用状态方程式结合热力学第一定律同样可推导出

$$PV^K = C \quad \text{及} \quad TV^{K-1} = C$$

式中 K 为气体定压比热 (CP) 和定容比热 (CV) 之比， $\frac{CP}{CV} = K$ ，并且可以证明

$$CV = \frac{AR}{K-1}。$$

对理想气体， CP 、 CV 及 K 在气体种类一定时均为常数，不随温度而变化。实际气体中 CP 及 CV 均随温度上升而增加，而 K 随温度上升而减小。一般根据气体种类和温度范围按平均值选用。

气体的比热是 1 公斤气体升高温度 1°C 所需的热量。而定容和定压比热是分别在容积

和压力不变情况下的比热。比热的单位是 $\text{kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$ 。

K 称为某种气体的绝热指数。在一定温度范围内，气体种类一定时，在该热力过程中 K 可看做常数。由实验可知， K 恒大于 1，故绝热线膨胀时压力的下降要较等温时为快，即在 P - V 图上绝热线较等温线陡。这是因为在等温过程中，压力的降低只由于体积的膨胀，而在绝热过程中，压力的降低不仅因体积的膨胀，还由于温度的降低，故在绝热过程中，压力降低较快。

总之，在绝热过程中 $P = F(V)$ 的函数关系也存在。

⑤ 对理想气体而言，在 P - V 图上的任一连续均衡过程， $P = F(V)$ 的函数关系经证明也是存在的，其普遍表示式为：

$$PV^n = C$$

对一定气体，一定的热力过程， n 是一个常数。气体性质及过程不同时， n 也不同。上式是揭示热力过程普遍规律的表达式，叫不变指数的多变过程。 n 称为过程中的多变指数，可为任何实数 ($0 \rightarrow \pm\infty$)。

对实际气体的过程， n 是个变数，这样的过程叫变指数多变过程，常常简化为某一平均 n 值的不变指数的多变过程来计算。

前面谈到的四种过程都是概括在多变过程中的几种特殊过程。

当 $n = \pm\infty$ 时， $PV^\infty = C$ ($P^{\frac{1}{n}}V = C$)。

即当 $n = \pm\infty$ ， $V = C$ ，为等容过程；

当 $n = 0$ 时， $PV^0 = C$ ，即 $P = C$ ，为等压过程；

当 $n = 1$ 时， $PV = C$ ，为等温过程；

当 $n = K$ 时， $PV^K = C$ 或 $TV^{K-1} = C$ ，为绝热过程。

结论：理想气体在 P - V 图上任一连续均衡的热力过程，它们的膨胀功均可用 $L = \int_{V_1}^{V_2} P dv$ 表示。当体积膨胀时，此功为正，当体积缩小时，此功为负。由图 1-5 可知 $dL = Pd v$ 代表阴影线所示垂直长条的面积， dv 愈小，此面积愈准确。而从 1—2 的膨胀功 $L = \int_{V_1}^{V_2} P dv$ 可以用过程曲线，横坐标轴以及两纵标所围的面积 11'22' 表示，简单地讲以过程曲线下的面积表示。当过程从 1—2，此功为正；当过程从 2—1，此功为负。在可逆过程中，由于没有气体分子骚乱及摩擦力，此膨胀功就代表了体系在过程中给外界功或消耗了的外界功 (dL' 或 L')。 $dL = dL'$ ， $L = L'$ 。在不可逆过程中，此膨胀功一部分消耗于气体分子骚乱运动的功能和摩擦功 (摩擦功是无法收回的，分子的骚乱运动的动能也变为热并为气体吸收，也是无法收回的) 剩下的才是在过程中给外界功 (dL' 或 L')，故 $dL \neq dL'$ ， $L \neq L'$ 。过程曲线即使存在，但下面的面积也不能真实地代表在过程中给外界功或消耗了的外界功。由此可知，研究可逆过程，不仅可充分利用 p - v 图上的曲线代表热力过程，而且可充分利用过程曲线下的面积来代表过程中对外界做的功。

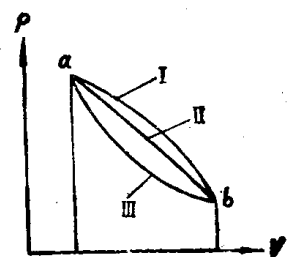


图 1-7 功的大小与过程特性有关

(4) 功和热量是过程的函数

由图1-7可清楚看出功之值与过程特性有关, 仅有气体始点和终点的状态a及b, 即始点与终点的压力P, 容积V和温度T是不能决定功的, 必须要有整条曲线ab才能决定功的大小。故 $\int_{V_a}^{V_b} Pdv$ 应写作L, 而不能与内能一样写成 L_b-L_a , 后者是无意义的。

既然功与过程的性质有关, 根据热力学第一定律的分析式, 作为内能和功的改变总和, 即外界供给体系的热量Q也与过程性质有关, 故 $\int_a^b dQ = Q$, 而不应写作 Q_b-Q_a 。

在图1-7的三个过程中, 内能的改变是相同的, 等于 u_b-u_a , 至于功很明显 $L_I > L_{II} > L_{III}$, 因而 $Q_I > Q_{II} > Q_{III}$ 。

第三节 热力循环及卡诺循环

一、热力循环、热效率

在每一个热变为功的机器中, 气体进行着膨胀过程, 因为只有膨胀时才发生正功。要使发动机继续不断地工作, 气体就要不断地重复膨胀过程。这种重复方法可由两种方法实现:

(1) 气体完成了一个膨胀循环后, 离开了发动机, 再加入发动机以同样重量及同样初始状态的新气体, 并重复膨胀过程。例如燃气轮机。

(2) 气体完成膨胀过程后, 本身恢复到初始状态, 再重复膨胀过程。

在后一种情况中发动机永远用同样部分的气体工作。气体在膨胀后要回到初始状态只有经过压缩才有可能, 这样就必须消耗外功。当然压缩过程的选择应使压缩所消耗的功小于膨胀所得的功, 即在图1-8中cda线必须低于abc线, 这样发动机按封闭图线abcda改变自己的状态, 交替地作压缩和膨胀, 并且周期地回到初始状态点a, 这种过程叫热力循环或封闭循环。

热力循环可以是可逆的, 也可以是不可逆的。与研究热力过程一样, 我们主要研究可逆的热力循环即理想循环。

在膨胀过程abc中, 气体对外界作功 $L_1 = \text{面积}abcc'a'a$ 。在压缩过程cda中, 气体被压缩时须消耗外界的功 $L_2 = \text{面积}cdaa'c'c$, 则在一热力循环终了时气体必然完成功 $L = L_1 - L_2$ 。此项正功由两个面积的差, 即封闭循环的面积来表示。

可以看出, 循环按顺时针进行时, 则系统作出外功而吸进热量, 这是由热化功的热机循环。如果循环反时针方向进行, 则系统接受外功而放出热量。冷冻机就属于后一种循环。

热力循环的热效率,

为了讲清热效率, 这里由简到繁, 先联系往复式蒸汽机的循环, 见图1-9。

在蒸汽机循环中, AB代表水及水蒸汽在汽锅中加热体积不变而压力增高的过程; BC代表一部分水蒸汽通入汽缸同时等压做功的过程; CD代表汽缸内不能再吸入水蒸汽而任已有水蒸汽继续绝热膨胀做功的过程。从A到C, 水蒸汽(工作体系)从高温热源(锅炉)吸收热量 Q_1 。从B到D系统作的外功, 可用面积aABCDEea来量度(正功)。DE代表汽缸与冷凝器接通后压力突然降低的过程。EA代表水蒸汽被排入冷凝器中凝结成水再到汽锅去加热的过程。从D到A, 系统向低温热源放出热量 Q_2 。从E到A, 系统接受的外功可用面积eEAae来度量(负功)。

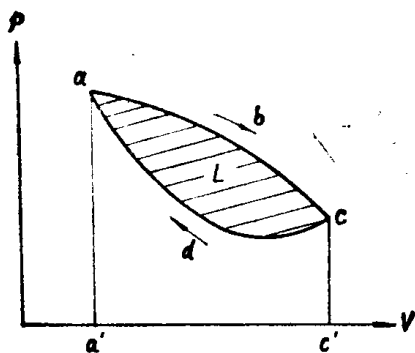


图 1-8 封闭循环的面积与功的关系

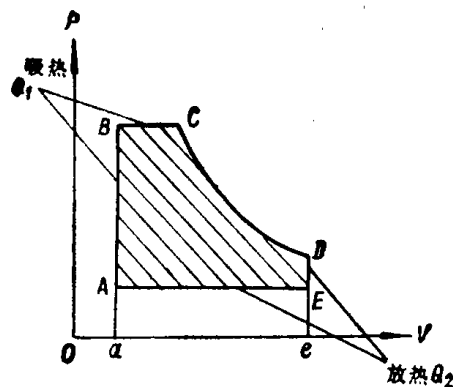


图 1-9 往复蒸汽机循环

综合起来讲，ABCDEA 代表一循环中系统作的外功 L 。由热力学第一定律分析式，系统既然回到原来情况 $u_2 - u_1 = 0$ ，体系在循环中净吸入的热量为 $Q_1 - Q_2$ ，

$$Q = u_2 - u_1 + AL, \text{ 即 } Q_1 - Q_2 = AL$$

即系统从高温热源吸收热量 Q_1 ，其中部分 Q_2 给了低温热源，另一部份 $Q_1 - Q_2$ 变成对外作的功。应该注意，此处吸来的 Q_1 热量未曾全部化为功。因之，热力循环的热效率：

$$\eta_t = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{AL}{Q_1}$$

热效率是评定热力循环中，把热能变为机械功深度的指标。如要热效率高，必须从高温热源得到尽可能多的能量 Q_1 ，并向低热源排出最少的热量 Q_2 。

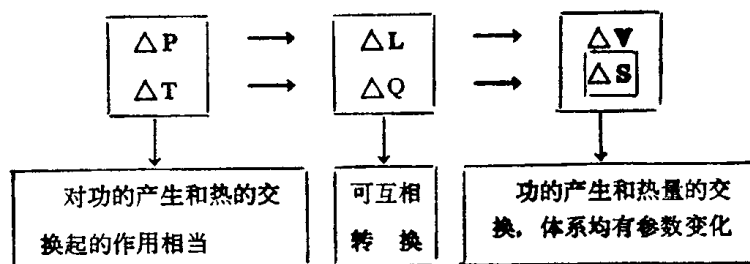
二、熵及温熵图 (T-S图)

熵也是一个说明体系状态特性的量。

前面讲到，功和热量均为与过程有关的物理量，且又能互相转换。体系与外界之间，有微小的压力差才能做功，有微小的温度差才能有热量交换。此处压力和温度对功的产生和热量的交换起的作用相当。对功来讲，体系做功时，体积必然变化。

我们把热量与功两者的性质进行对比分析后，可以问，体系热交换后什么参数变化呢？加以推理可以断定、对应于热量来讲，必定有那么一个参数，体系与外界热交换时，此状态参数必须发生变化。气体吸热时，它的数值增大，放热时其数值减小。

功和热量有关的一些状态参数之间有以下关系：



这样推导出来的一个参数称为“熵”以“ S ”表示。即体系进行热交换时熵起变化。

按照膨胀功的计算式 $dL = PdV$ ，则热量的计算式可对应地写成， $dQ = Tds$ (T 恒为正值)。

熵的单位为：千卡/ $^{\circ}K$ 。

熵是从热力学的基本定律推导出来的物理量，在很多情况下熵可以简化理论上的结论和实际中的运算。熵的值无法用仪表直接测量出来，这样的参数叫导得状态参数。

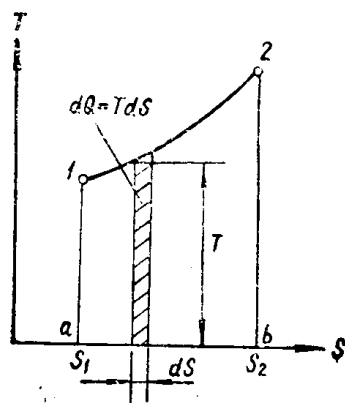


图 1-10 T-S图曲线下面积含意

对应于 P-V 图，经证明也可作 T-S 图。如图1-10所示，T-S 图中过程曲线下面的面积 12ba1 代表过程中体系与外界交换的热量，即

$$Q = \int_1^2 T ds$$

以上的数学表达式对任何可逆过程都是正确的。

当 $ds > 0$ 为吸热过程， dQ 为正。

当 $ds < 0$ 为放热过程， dQ 为负。

当 $ds = 0$ 为绝热过程， dQ 为零。

当 $T = C$ ，为恒温过程。 $ds = \frac{Q}{T}$ 即当一系统温度恒定

于 T 而吸收热量 Q ，则此系统熵的增加量为 $ds = \frac{Q}{T}$ 。

三、卡诺循环

卡诺从实践中总结出一个热效率最高，最经济的理想循环。这个循环是由两个可逆等温过程和两个可逆绝热过程组成。

卡诺热机是一个理想热机，它假定气缸缸头无热阻，缸壁绝热，活塞与缸壁之间不存在摩擦。高温热源和低温热源（冷源）无限的大，绝热缸盖移开或盖上非常及时。气缸中有 GKg 气体，且为封闭体系。见图1-11。

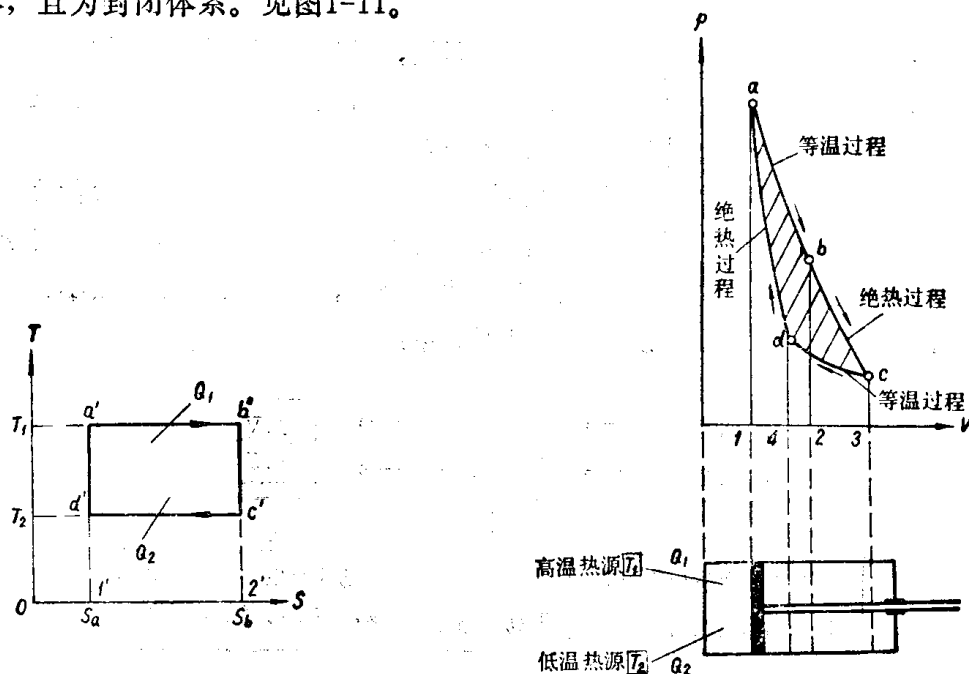


图 1-11 卡诺循环的P-V图和T-S图

它的循环过程是：开始于状态点 a ，保持温度 T_1 情况下等温膨胀到 b 。作膨胀功 L_{ab} (P-V图面积 $ab21a$)，并由高温热源吸入热量 Q_1 (T-S图上面积 $a'b'2'1'a'$)。然后把热源

拿开及时盖上绝热缸盖, 气体再作绝热膨胀到状态 C, 作膨胀功 L_{bc} (P-V 图上面积 $bc32b$), 继而把绝热缸盖移去, 换以低温热源, 保持温度在 T_2 情况下, 从状态 C 等温压缩到 d, 作压缩功 L_{cd} (P-V 图上面积 $cd43c$) 同时向冷源放出热量 Q_2 (T-S 图中 $c'd'1'2'c'$), 最后把冷源从缸头移开换以绝热缸盖, 在绝热情况下压缩气体回到初态。作压缩功 L_{da} (P-V 图上面积 $da14d$)。于是完成一次卡诺循环。循环所得的净功:

$$L = L_{ab} + L_{bc} - L_{cd} - L_{da} = \text{面积} abcd a \text{ (P-V 图上阴线部分)}$$

卡诺循环的热效率可从 T-S 图方便地求出:

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{\text{面积} c'd'1'2'c'}{\text{面积} a'b'2'1'a'} = 1 - \frac{T_2(S_b - S_a)}{T_1(S_b - S_a)} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

式中 T_1 ——气体作等温吸热过程的温度, 等于热源温度, 为正值;

T_2 ——气体作等温放热过程的温度, 等于冷源温度, 也为正值。

卡诺热效率的公式表明:

- (1) 卡诺循环效率仅与热源与冷源温度有关, 与采用气体的性质无关。
- (2) 提高热源温度, 并降低冷源温度, 是提高循环热效率的有效途径。
- (3) 当 $T_1 = T_2$ 时, $\eta_t = 0$ 即不能发生热功转换, 就是说单热源的热机是不能实现的。
- (4) 实际上冷源温度 T_2 一般为环境温度, 约为 300°K , 太低就不方便。热源温度受一般材料限制不能太高, 约为 2000°K , 所以循环热效率恒小于 1。说明即使用最经济的理想循环, 热化为功时必须伴随着有一部分热量从热源输至冷源, 这一事实是无法避免的。
- (5) 在相同的 $T_1 \sim T_2$ 温度范围内工作的任何循环的热效率都不可能大于卡诺循环的

热效率 ($\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}$), 这是可以证明的。

证明可逆的任何其他循环热效率均低于卡诺循环:

与在 P-V 坐标中相同, 热力过程在 T-S 图中也可以封闭曲线表示。图 1-12 所示为一般性的可逆循环 ABCD, 热力过程按箭头方向进行变化。在路程 ABC 中, 气体须由热源得到热量:

$$Q_1 = \text{面积} ABCC'A'A$$

而在路程 CDA 中, 气体给冷源以热量:

$$Q_2 = \text{面积} CDAA'C'C$$

每循环交给气体的热量: $Q = Q_1 - Q_2$, 它转变为相当于它的每一循环功 L , 同时, $Q = Q_1 - Q_2 = AL = \text{面积} ABCDA$, 即与 P-V 图中一样, 循环的封闭图形面积相当于用热量单位表示的每一循环功。循环正时针方向进行时, 功为正值, 反之为负值。

与卡诺循环不同之处是一般循环中, 气体在路程 ABC 上的吸热, 以及在路程 CDA 上的放热都是在温度改变的情况下进行的。但是可以假设物体放热和吸热是在某一平均温度 T_1 和 T_2 下进行的。这二个温度值可用下法得到 (见图 1-13): 作与面积 $ABCC'A'A$ 及 $CDAA'C'C$ 相等的矩形 $MNC'A'M$ 及 $PRA'C'P$, 其底均为 $A'C'$ 。在这样的情况下, 显然面积 $MNC'A'M = \text{面积} ABCC'A'A = Q_1$, 面积 $PRA'C'P = \text{面积} CDAA'C'C = Q_2$, 以及面积 $MNPRM = \text{面积} ABCDA = Q_1 - Q_2 = Q = AL$ 。这样我们得到与图 1-13 中任意循环 ABCDA 相同的卡诺循环 MNPRM。在这两种情况中, 气体均自外界得到热 Q_1 , 放出热 Q_2 , 完成的功 $AL = Q =$

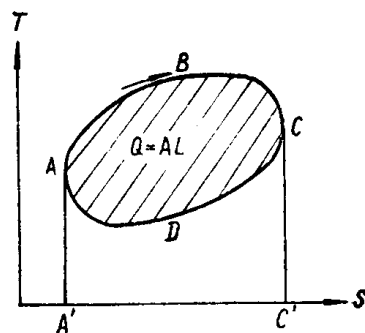


图 1-12 可逆的任意
热力循环

$Q_1 - Q_2$, 故图中循环 ABCDA 的热效率与卡诺循环 MNPRM 的热效率 $\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ 相同。

两个循环的基本区别是在于卡诺循环中吸热和放热是在恒温 T_1 及 T_2 下进行的; 而任意循环是在温度改变下进行的, 其 T_1 及 T_2 只是平均温度。由图 1-14 可见, 只有当 $T_1 > T_2$ 时, 热才可能部分地转换为功。

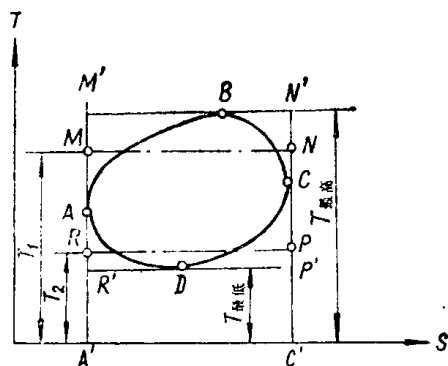


图 1-13 任意循环可相当于对应的卡诺循环, 但任意循环的效率始终低于同样温度范围内的卡诺循环

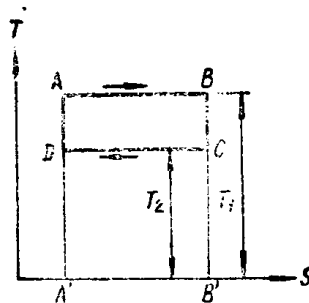


图 1-14 卡诺循环中 $T_1 > T_2$ 时热才可能部分时转换为功

由图 1-13, 对一定温度范围而言, 即在极限温度 $T_{\text{最大}}$ 及 $T_{\text{最小}}$ 之间, 卡诺循环的效率为 $\eta_c = 1 - \frac{T_{\text{最低}}}{T_{\text{最高}}}$, 在同样的极限温度范围 $T_{\text{最大}}$ 及 $T_{\text{最小}}$ 之间, 任意循环 ABCDA 的热效率可用 $\eta_i = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ 表示。而在任意循环 ABCDA 中 $T_2 > T_{\text{最低}}$, 及 $T_1 < T_{\text{最高}}$, 故 $\eta_i < \eta_c$ 。

因为在实际热机中, 应确定循环的极限温度之后来考虑其热效率, 因此卡诺循环在理论上是最经济、最合理的循环。这在指导实践中极为重要。

第四节 热力学第二定律

热力学第一定律建立了热能和机械能的当量性, 以及当能量由一种形式转换为另一种形式时数量上的关系。但它没有提及这种转换是在什么条件下才有可能。一般地讲, 把功变为热是没有什么困难和限制的, 例如: 摩擦功、压缩功、消耗于卡诺循环或任意热力循环的功均可全部地转变为热。任何一部发动机的功可以用制动的方法使它全部转变为热。

变热为功却完全是另一回事。例如, 已讨论过的卡诺循环是最理想最经济的循环, 但也不能把热全部变为功。在循环中的一部分热没有被利用, 而是一种无用的热, 它由高温水平转到低温水平, 热变为功时这一部分热量的质量上的损失是无可避免的, 这不仅对卡诺循环, 对其他任何热力循环更是如此。

卡诺循环也说明了不可能制造出一种机器, 它只使用一个热源使它冷却后来作功。

自然界中的一切自发的热力过程是单向进行的, 功变为热, 热由高温物体转移到低温物体; 而热变为功, 热由低温物体转移到高温物体只能靠人为过程来完成。而有人为过程