

SFE

特种发动机

刘世贤

王仁泉 编著

王成照

浙江大学出版社



前 言

随着当今世界科学技术的迅速发展和能源消费结构的变化，人们在不断完善现有动力机的同时，还在为探索、开发新型动力而顽强奋斗，以迎接21世纪的到来。热气机(斯特林发动机)由于能燃用多种燃料，可利用各种能源，具有良好的环境特性，适应了当前石油资源日益紧张和对环境保护渐趋严格的要求，无怪乎受到许多国家的关注，并纷纷投入巨资积极进行研制。低散热发动机的研究和高温结构陶瓷在发动机上的应用，它们在节能和节约稀有金属方面的潜力正待发挥。旋转活塞发动机适应了内燃机向高速、轻量化发展的需要，采用现代技术对目前产品进行改进，必然会在内燃机家族里占据应有的位置。而自由活塞发动机的工作原理及结构特点，在开拓新型动力机方面仍有借鉴作用。总之，在特种发动机的发展过程中，道路是曲折的，前景是富有意义的。

为了跟上经济、技术发展的新形势，在教育事业上也在贯彻面向现代化、面向世界、面向未来的精神。本教材编写的目的，就在于扩大学生知识面，开拓思想，以适应未来的发展。

刘世贤编写的同名讲义，1984年就开始在浙江大学热物理工程系(现为能源系)作为本科生选修课教材使用，其间讲义经过两次的补充、修改。本书是根据编者多年来教学和科研实践所积累的大量资料编著而成的，并收集了有关发动机的最新动态。

本书共分四章，由浙江大学刘世贤(第一章一、三节、第二章、第四章)、王仁泉(第三章)、西南交通大学王成照(第一

章二、四节)共同编著。上海711研究所沈岳瑞高级工程师、湖南大学谢彦玮教授审阅了稿件,提出不少极为宝贵的建议和修正意见,浙江大学内燃机研究所的许多同志给予了关怀和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

本书牵涉内容较广,由于教材篇幅限制,比原讲义作了较多的删节,只能作梗概论述。限于编者水平,书中错误和不妥之处,希望读者批评指正。

编 者

1991年元月于杭州

目 录

第一章 热气机

第一节 热气机的工作原理	(3)
1.1.1 斯特林循环	(3)
1.1.2 热气机的结构类型	(9)
1.1.3 热气机工作原理	(14)
1.1.4 理想循环与实际循环	(19)
第二节 热气机的构造	(24)
1.2.1 外部供热系统	(26)
1.2.2 闭式循环系统	(33)
1.2.3 动力传动系统	(45)
1.2.4 调节控制系统	(47)
1.2.5 典型样机简要介绍	(51)
第三节 热气机的循环分析及特性	(55)
1.3.1 施密特循环分析法	(55)
1.3.2 影响热气机性能的主要因素	(65)
1.3.3 热气机的特性	(76)
1.3.4 热气机的发展及应用	(80)
第四节 热气机基本参数的选择及计算	(88)
1.4.1 设计参数及工质的选择	(88)
1.4.2 循环功的计算	(92)
1.4.3 热气机的效率	(101)
1.4.4 电算方法在热气机设计中的应用	(104)

第二章 低散热发动机

第一节 低散热发动机的基本概念	(108)
-----------------	---------

2.1.1	低散热技术的应用	(109)
2.1.2	低散热复合发动机的类型	(116)
2.1.3	采用隔热技术后的热损失及壁温	(120)
第二节	低散热发动机的性能分析及预测	(125)
2.2.1	低散热技术对某些性能指标的影响	(125)
2.2.2	低散热发动机的性能预测	(127)
第三节	结构陶瓷的发展及性能	(134)
2.3.1	结构陶瓷的发展概况	(134)
2.3.2	陶瓷材料的制备工艺及性能	(136)
2.3.3	陶瓷材料存在的问题	(142)
第四节	陶瓷发动机	(142)
2.4.1	陶瓷发动机的零件结构及研制情况	(144)
2.4.2	陶瓷发动机的发展	(153)
2.4.3	存在问题和科研方向	(156)

第三章 旋转活塞发动机

第一节	旋转活塞发动机产生的背景及工作原理	(162)
3.1.1	产生的背景	(162)
3.1.2	旋转活塞发动机的工作原理与几何学关系	(165)
第二节	旋转活塞发动机的结构	(198)
3.2.1	基本结构	(198)
3.2.2	发动机的冷却系	(211)
3.2.3	发动机的润滑系	(215)
第三节	现状与展望	(219)

第四章 自由活塞发动机及其他

第一节	自由活塞发动机	(222)
4.1.1	自由活塞发动机的工作原理	(222)
4.1.2	自由活塞发动机的特殊部件	(226)
4.1.3	自由活塞动力学	(229)
4.1.4	自由活塞发动机的主要优缺点	(233)
第二节	催化引燃发动机	(235)

4.2.1	发动机的结构特点	(235)
4.2.2	发动机的燃烧系统与工作原理	(236)
4.2.3	对催化燃烧系统性能的分析	(237)
第三节	小型脉冲喷气发动机	(238)
4.3.1	发动机结构及工作原理	(239)
4.3.2	脉冲喷气发动机的应用及特点	(241)
第四节	光化反应发动机	(242)
4.4.1	NO_2 的光化学特性	(242)
4.4.2	光化反应发动机的结构	(243)
4.4.3	照射运转实验	(245)
	参考文献	(247)

第一章 热 气 机

热气机是一种外部加热闭式循环活塞式发动机。1815年,英国苏格兰牧师罗伯特·斯特林 (Robert Stirling) 发明了这种发动机,当时是利用燃烧炉对闭式回路中的空气进行加热,由炽热空气推动活塞做功,实则为热空气机。图1-1是斯特林发明的原始型热气机,1818年用于矿井带动水泵工作。因此,热气机又常称为斯特林发动机 (Stirling Engine)。

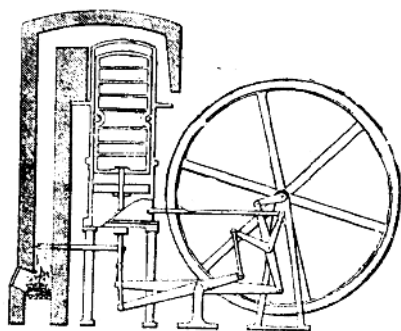


图1-1 斯特林发明的第一台热气机

热气机出现后的几十年,曾经风行一时。但当时热气机采用的工质是空气,其导热系数低,又限于当时的材料及制造水平,加热器、回热器的换热效果很差,因而发动机热效率低,机器功率小而体积、重量很大,以致逐渐被后起的内燃机所取代而没有

得到进一步发展。

近数十年来，人们又对这种发动机进行了大量的研究工作，对热气机技术作了根本性的改革：如采用导热率比空气高几倍的氢或氦作为工质，设计制造了具有现代技术水平的高效率热交换器，研制成新型的密封装置等，使热气机的热效率和功率得到大幅度的提高，面貌为之一新。现代热气机所达到的热效率、比重量等性能指标，已可以和高效的内燃机媲美。

由于热气机对工质采取外部加热的方式，从而可以燃用多种燃料，还可利用太阳能、核能等作为热源。此外，它的排污少、噪声低、振动小、环境特性好。这些优点适应了当前世界范围内石油资源日趋紧张，对环境保护日益严格的要求。为此，引起了不少国家的关注和兴趣，纷纷投入巨资进行开发。近20年来，除了最先进行现代热气机开发研究的荷兰飞利浦公司以外，已有美国、日本、瑞典、英国、西德、中国等10多个国家上百个单位（包括大学、科研机构、公司）相继参加研制行列，投入总经费约二亿美元。由于热气机的特点，使它的适用范围很广：上至太空、下至地面和水下；大至舰船动力，小至人造心脏。目前已设计、试制出各种用途多种型号的热气机，有些已通过耐久试验，正向商品化过渡，有些安装在汽车、船舶、热泵系统、农村碾米厂、卫星及沿海的浮标上，进行实际使用考验。

鉴于许多国家和部门在热气机的理论和实践方面进行了大量工作，1982年在英国的雷丁大学召开了第一届国际斯特林机会议，为斯特林机的发展在国际交流和合作上开创了条件。接着两年一次，在上海、罗马、东京又召开了会议。从几次国际会议的内容可看到，热气机的研究已从开始时的理论性探索，逐步进到提供实验装置或样机试验报告，还出现作为商品的产品介绍，说明现代热气机正朝实用化阶段前进。

第一节 热气机的工作原理

热气机的工质被密封在闭式循环回路中，通过一个外部加热（或燃烧）装置对工质进行加热，由活塞的运动来控制工质在回路中的流动。热气机有一个加热器、一个冷却器、通常还有一个回热器，使工质在高温下膨胀作功，在较低温度下压缩，膨胀结束后的工质不排至外界而被循环使用。热气机将热能转化为机械功是由密封在回路中的炽热气体周期性地膨胀和压缩实现的。热气机的理想循环是斯特林循环。

1.1.1 斯特林循环

从热力学可以知道，热能对机械能的连续转换，是通过工质在动力装置中实施热力循环来实现的。任何实际动力装置中的热力过程都是不可逆的。但为了对循环进行热力学分析，常常将实际不可逆循环简化为理想的可逆循环。

斯特林循环是热气机的理想循环，是一个高度理想化的热力过程。它由两个定温过程（定温压缩和定温膨胀）和两个定容回热过程（定容吸热和定容放热）所组成。这四个过程如图1-2所示。

过程1-2为定温压缩过程。工质的容积从 V_1 被压缩至 V_2 ，过程中工质向冷源放热，以保持温度 T_c 不变，但工质压力升高。

过程2-3为定容吸热过程。过程中工质容积保持不变，但低温工质经过回热器装置并吸取其热量。可以把回热器设想成是一块交替地放热和吸热的热力海绵。于是工质温度从 T_c 升高到 T_E ，工质压力也升高。

过程3-4为定温膨胀过程。过程中工质膨胀并从热源不断吸取热量，使工质温度 T_E 维持不变，但压力下降。

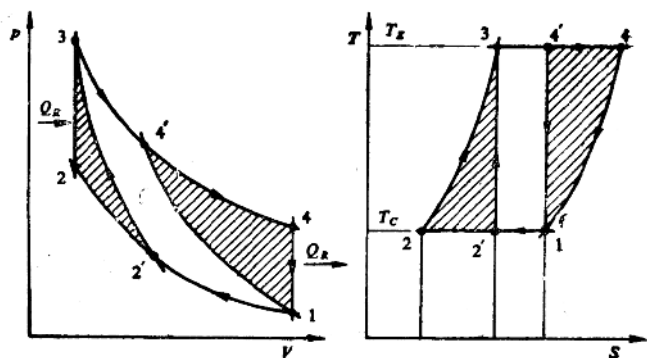


图1-2 斯特林循环与卡诺循环的比较

过程4-1为定容放热过程。工质在容积不变的情况下将热量释放给回热器，工质的温度和压力均下降并回复到始点状态。至此，一个循环完成了。由于工质流过回热器进行热交换是在定容过程中完成的，所以，有时又将斯特林循环称为定容回热循环。

为了进行比较，在图1-2中还示出了卡诺循环。卡诺循环是由两个定温过程（图中的1-2'和3-4'）和两个绝热过程（2'-3和4'-1）所组成的可逆循环。卡诺循环的热效率 $\eta_C = 1 - (T_C/T_E)$ ，它仅与热源和冷源的温度有关，与工质的性质和热机的类型等无关。从热力学的观点看，卡诺循环是最有利的一种热力循环，具有最高的热效率。在冷源与热源的温度比值相同的情况下，任何一种热机的循环效率都不可能高于卡诺效率。

斯特林循环与卡诺循环的共同特点是：两者的压缩过程和膨胀过程都是在定温条件下完成的，不同的是其余的两个过程。斯特林循环在极限回热的情况下，其定容放热过程4-1所释放的热量与定容吸热过程2-3所吸收的热量相等，于是其效果和卡诺循

环的两个绝热过程相当。所以，在相同的循环温度比条件下，斯特林循环热效率与卡诺循环热效率相同。内燃机的理想循环——奥托循环和笛塞尔循环的热效率均低于卡诺循环。

在 $p-V$ 图中，由循环过程所组成的面积表示循环功的大小。斯特林循环优于卡诺循环的地方，是它用两个定容回热过程代替卡诺循环的两个绝热过程。斯特林循环的定温过程线1-2和3-4是由卡诺循环的1-2'和3-4'延伸而来的，结果大大增加了斯特林循环功图的面积。从图1-2可见，在给定的压力、温度和容积界限下，斯特林循环的循环功（面积1-2-3-4-1）比卡诺循环功（面积1-2'-3-4'-1）要大。 $p-V$ 图中的阴影面积代表斯特林循环比卡诺循环增加的功， $T-S$ 图中的阴影面积则代表斯特林循环比卡诺循环需要增加的热量。输入热量增加了，但输出功也相应增加，其输入热量转换为功的比例（即热效率）仍与卡诺热效率相同。在1.1.3将作具体证明。

为了评价循环的动力性，人们提出了一个很重要的参数，即循环平均压力 p_i 。循环平均压力表示单位气缸工作容积所做的循环功，即 $p_i = W/V_0$ ，它用来说明单位气缸工作容积做功能力的大小。 p_i 越高，说明做功能力越大。在循环压力和温度相同的情况下，斯特林循环的循环平均压力最高，单位气缸容积所做的功最大。活塞式发动机的升功率指标反映了发动机的强化程度及设计水平，它与 p_i 有着正比的关系。目前已试制成的热机中，每升气缸工作容积能产生150kW的功率，而目前内燃机是难以达到的。

在活塞式发动机上实现卡诺循环的困难是很大的，主要是因为气体（例如空气）的定温过程和绝热过程在 $p-V$ 图上的斜率差别很小，因此在 $p-V$ 图上循环过程所呈现的面积也很小，除非采用极高的压力和极长的活塞冲程。这将使发动机变得很笨重，甚至有可能不能产生足够的功去克服自身的摩擦损失。尽管

如此，在研究热机的理想循环时，卡诺循环仍具有重要的指导意义。而斯特林循环的活塞式发动机却得到了实际的发展。

斯特林循环可用于多种热机。上面所讨论的，在某一高温热源的 T_E 下对循环供热，其中部分热量转变为功，其余部分在低温的 T_C 下以热的形式被排掉，这就是对原动机工作循环的描述。所谓原动机就是把高温热源供给的热转换成功并在低温下排热的机械。

斯特林循环用于制冷机时，与原动机唯一不同的是外部热源在膨胀过程中的温度低于压缩过程中工质的释热温度。如图1-3所示，在原动机工作的 p — V 和 T — S 图上附加了制冷机循环。当作为制冷机工作时，其膨胀过程 $3' \rightarrow 4'$ 把热量从冷区抽走。压缩功

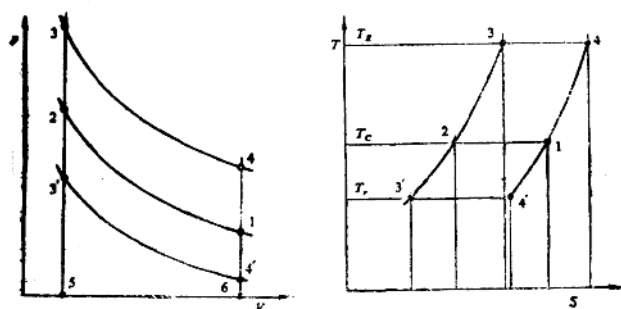


图1-3 原动机和制冷机的斯特林循环

(面积 $1-2-5-6-1$)对原动机和制冷机都是相同的。制冷机的膨胀功(面积 $4'-3'-5-6-4'$)低于其压缩功，也就是说面积 $1-2-3'-4'-1$ 的功需要由外界提供以驱动循环的进行。工质在过程 $2-3'$ 从压缩腔转移到膨胀腔时，其温度降

低，而在反向的回热过程4'—1时，工质温度相应地增加。

可以用性能系数 COP (Coefficient of Performance) 或称制冷系数来评价制冷机的性能，即

$$COP = \frac{q_2}{W} = \frac{\text{吸出的热量}}{\text{驱动功}} = \frac{T_r}{T_c - T_r} \quad (1-1)$$

斯特林用于原动机和制冷机，两者都是在 T_c 温度下压缩。原动机是在高温下由外界供热，在高温的 T_E 下膨胀以产生有用功。制冷机则是在低温的 T_r 下膨胀从外界吸入热量以制冷，但需向制冷机输入净功用于压缩工质。

斯特林循环用于热泵，其工作过程与制冷机完全相同，它的膨胀腔温度 T_r 也低于压缩腔温度 T_c ，不同的是热泵的 T_c 与 T_r 都比制冷机的温度提高了。在原动机和制冷机中的 T_c ，一般都是环境大气温度 T_0 ，因此可以用水冷却，而热泵的 T_c 是系统的放热温度，此时排出的热量是作为有用的产物来为建筑物如办公楼、宾馆、宿舍供暖。热泵循环在膨胀过程中将低温热源（如河水或环境空气）的热能 q_2 吸入，并以 q_1 的热能在较高的温度下排出。

斯特林循环用于热泵和制冷机的性能比较示于图 1—4 和 1—5。两者工作时，膨胀过程温度均低于压缩过程温度，都需要外界做功来驱动循环运行。但对热泵来说，膨胀过程是在大气

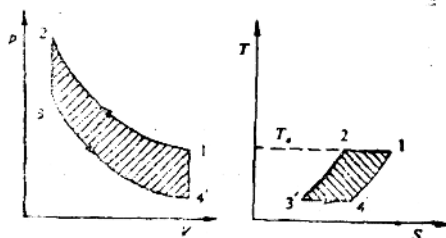


图1-4 制冷机的斯特林循环

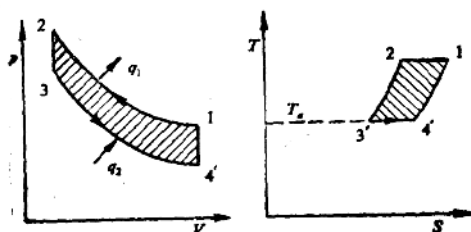


图1-5 热泵的斯特林循环

温度下发生，而压缩在高温下进行，其排出的热量即为循环的有效输出。

热泵的性能系数 COP_{hp} 可表示为：

$$COP_{hp} = \frac{q_1}{W} = \frac{\text{排出的热量}}{\text{驱动功}}$$

向高温热源排出的热量 q_1 等于取自低温冷源（如大气环境）的热量 q_2 与实现理想循环从外界输入功 W 之和，即 $q_1 = q_2 + W$ 。于是

$$\begin{aligned} COP_{hp} &= \frac{q_2 + W}{W} = COP + 1 \\ &= \frac{T_c}{T_c - T_r} \end{aligned} \quad (1-2)$$

可见，热泵性能系数 COP_{hp} 总是大于1的。这说明，热泵可以回收热能，消耗1个单位的能量可以产出高于1个单位的能量，达到节能的效果。

斯特林循环在热力学上有很大的可逆性。一台斯特林循环的活塞机，若用电动机按顺时针方向拖动，则缸头上（包括与膨胀腔连接的管道）会出现霜花，这就起制冷机的作用。若将缸头及膨胀管加热（这时膨胀管为加热管），活塞机仍按顺时针方向转动，

则成为原动机即热气机。在实际的场合，由于设计参数和材料要求的不同，难以使一台斯特林循环的活塞机，既作制冷机、同时又作热泵或热气机使用。但从循环特性来看是完全可能的。在下面的章节，仅介绍作为原动机使用的斯特林机——热气机。

1.1.2 热气机的结构类型

热气机的主要结构特点是具有两个温度不同而容积作周期性变化的腔室，并用换热器把这两个腔室联结起来。

对具体的热气机而言，为了实现斯特林循环，要有两个运动的活塞使工作腔容积发生变化。为了在热力过程中实现定温压缩，需要有一个压缩腔，并配置能将压缩热导出的换热器——工质冷却器。为实现定温膨胀，要具备一个膨胀腔，并应设置使工质能作定温膨胀的供热设施——工质加热器。为实现回热循环，还应有一个交替地吸热和放热的装置——回热器。各种类型的热气机不论其布置形式如何，均存在由冷腔、冷却器、回热器、加热器、热腔所组成的闭式循环系统。

为了使工质在闭式循环回路中的流动能满足热力循环过程的要求，两个活塞的运动必需保持某一相位差，否则是不能工作的。一般规定热活塞（在热腔中运动的活塞）运动领先于冷活塞运动的曲轴转角称为活塞领先角 φ 。热腔容积变化领先于冷腔容积变化的角度（即热腔最小容积时到冷腔最小容积时两者之间曲轴转角）称为容积相位角 φ_v 。领先角 φ 是对热气机性能颇有影的设计参数，以后还要作介绍。

热气机自19世纪问世以后，一百多年来曾涌现许许多多的结构布置型式。大体可以归纳为以下三种类型。

1. 单作用式热气机

这种类型的热气机有两个活塞分别置于两个气缸中，靠近冷却器一侧的缸叫压缩气缸（也叫冷缸），活塞叫压缩活塞。靠近

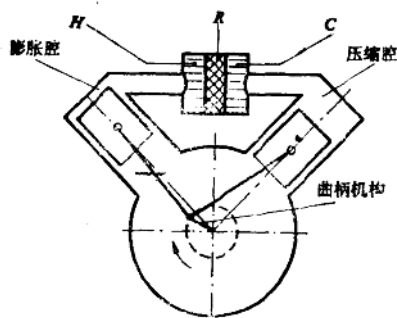


图1-6 单作用式热气机

H——加热器 R——回热器 C——冷却器

工作腔。单作用式热气机两个活塞在循环过程中都传递动力，均称为动力活塞。它对循环系统的密封在活塞上。这种类型热气机又有平行气缸、V形气缸、对置气缸及旋转气缸等多种形式。

2. 配气活塞式热气机 *

这种类型的热气

加热器一侧的缸叫膨胀气缸(也叫热缸)，活塞叫膨胀活塞。(见图1-6)。单作用式是相对于双作用式而言的，是指两活塞都只有一方为工作腔(图中为上方)，构成闭式循环回路中的冷腔或热腔，两腔之间连通各换热器，而活塞的另一方为非

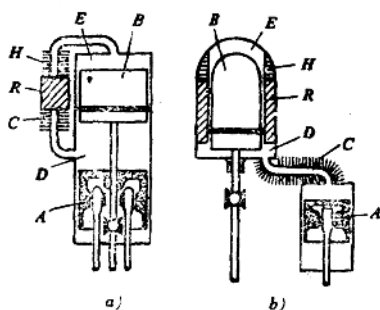


图1-7 两种配气活塞式热气机

A——动力活塞 B——配气活塞
D——冷腔 E——热腔

*：此类热气机在某些书刊上亦称之为单作用式热气机。但由于其结构特点与其他类型有较大的不同，而且形式繁多，故本书把配气活塞式热气机单独归纳为一类。

机又有单缸与双缸之分。

(1) 单缸配气活塞式热气机

这种结构是在同一缸内设置两个活塞、〔参看图1-7(a)〕，靠近加热器一端的活塞叫配气活塞，活塞上方的腔室叫膨胀腔（热腔）；靠近冷却器一端的活塞叫动力活塞，动力活塞上方与配气活塞下方所形成的空间叫压缩腔（冷腔）。热腔与冷腔之间与加热器、回热器、冷却器串连在一起，形成一个完整的循环回路。热腔和加热器处于循环的最高温度下，叫热区，冷腔和冷却器处于循环的低温区，叫冷区。配气活塞的主要功能是将工质从一个腔室挤向另一个腔室，使工质在循环回路中来回流动，故配气活塞又有工质置换器（Displacer）之称。

配气活塞上、下腔的压力理论上是相同的（如不考虑流动损失）。而动力活塞上、下腔的压力在整个循环中均不相同（除某瞬时外），当动力活塞在气缸中运动时，活塞压缩工质或工质膨胀通过活塞做功。这种热气机的特点是：热腔容积的变化由配气活塞运动所控制，而冷腔容积变化则要由配气活塞和动力活塞两者的运动联合控制。两个活塞的行程有一段可以是重叠的，故冷腔的最小容积理论上可以是零。从图1-8可以看到， S_L 即是其重叠行程。

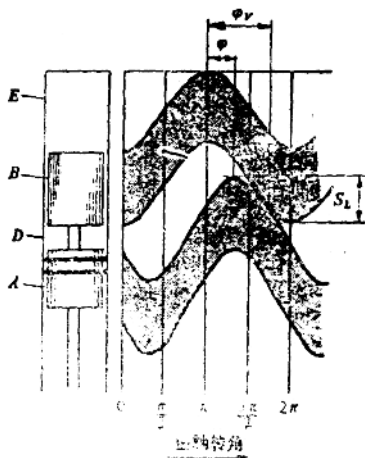


图1-8 配气活塞和动力活塞的运动

E——热腔 B——配气活塞
D——冷腔 A——动力活塞