

热 气 机

钱国柱 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书简要系统地介绍了热气机(斯特林发动机)的构造、工作原理、特性以及影响热气机性能的主要因素,并扼要地介绍了热气机的现状和发展趋势。本书在全面地讨论了热气机特性的基础上,讨论了热气机的主要用途,并重点介绍了热气机作为船舶动力,特别是作为潜艇动力的可能性。

本书适用于具有中等文化程度的读者阅读,对科研、设计人员和大专院校的师生以及科研管理干部也有一定的参考价值。

热 气 机

钱 国 柱 编

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 8⁷/₈ 224 千字

1982年10月第一版 1982年10月第一次印刷 印数: 0,001— 1,900册

统一书号: 15034·2373 定价: 1.10元



编者说明

本书主要是根据国外有关资料编写的。目的是介绍热气机的构造、工作原理、特性，并力图与普通内燃机进行比较，将热气机的一般概况介绍给读者，以引起有关方面的兴趣与注意。由于热气机仍处在发展与完善阶段，主要零部件今后有可能作不同程度的改进，故本书仅介绍其功用和要求。

书中系统简要地介绍了热气机的结构类型、一般构造、工作原理、性能以及影响性能的主要结构因素和工作参数，并扼要地介绍了热气机的现状和发展趋势。本书以较大篇幅讨论了热气机的性能和特点，提出了热气机性能的评定标准，并介绍了热气机的初步设计方法；在全面讨论热气机固有特性的基础上，说明了热气机的主要用途，并着重讨论了热气机作为汽车动力和船舶动力，特别是作为潜艇动力的可能性。

在编写过程中，得到了不少单位和同志的关心与帮助，特别承哈尔滨船舶工程学院和上海汽车配件修配厂等单位的帮助，提出了宝贵意见，最后由沈岳瑞同志审阅全文并写了前言，在此表示衷心感谢。

由于编者水平低劣，缺点和谬误在所难免，敬希读者批评指教。

前 言

热气机（国外称斯特林发动机——Stirling Engine）是一种新型的、利用外部能源加热的闭式循环活塞式发动机。它具有热效率高（额定工况及部分负荷时效率均高。车用热气机的有效效率已达 32~38%，固定装置和船用热气机的有效效率可达 38~42%）、环境特性好（特别是排气污染低和噪音小。当热气机采用柴油作燃料时，排气有害成分的含量为：氧化氮 0.1~0.2 毫克/马力·秒、氧化碳 0.05~0.2 毫克/马力·秒、未燃碳氢化合物 0.0015~0.009 毫克/马力·秒，大大低于回热式燃气轮机和普通的活塞式内燃机。噪音比同类型内燃机低 15~25 分贝（A），通常为 70~85 分贝（A），低值可低于 60 分贝（A）、运转平稳（热气机基本上可予以完全平衡，消除振动；四缸机的扭矩不均匀度仅 1.05~1.09）、扭矩——转速特性好（热气机的转速比很大，通常都在 10 以上，在广阔的转速范围内扭矩变化不大）、基本上无滑油消耗以及能适用多种燃料或多种能源（如液、气、固态燃料、太阳能、原子能、化学反应能等）等特点，致使它具有很广泛的适用范围，越来越受人们的重视。由于国外已进行了长期、深入的研究发展工作，理论与实践上的一些技术关键问题，正在逐一得到解决。据报导，国外高效率、低污染的车用热气机（100~300 马力）将在八十年代初期进行小批量生产。热气机具有可制成极小功率的特点，因此小型太阳能热气机，甚至利用放射性同位素作为外部热源的热气机血泵（以放射性同位素钷²³⁸为热源的完全植入式人工心脏）和热气机发电机组都是当前的重点研制项目。现在世界上主要的海军国家，特别注意的是热气机可以利用特种能源工作（如化学热源和原子能），因此作为潜艇动力可以消除航

迹，而且运转安静，又可长期潜航，且有比常规电池和燃料电池大得多的功率/重量比，是中小型潜艇较为理想的动力。将来原子能反应堆小型化以后，热气机仍是中、小功率动力装置中经济性较高的发动机，因此热气机是目前很多海军国家的一个共同研制对象。目前国外已有近九十个单位或专门组织正在研究、发展各种类型的热气机，前后已发表了 1200 篇左右的有关文献或报导，不少研究单位得到政府的资助。

在理论上，热气机可制成 3000 马力/缸，目前 400~500 马力/缸的热气机已在实验室内进行试验，预计在船舶、机车、汽车及发电设备中的中小型热气机都有可能成为内燃机的竞争对手。

我国目前进行热气机的研究尚属初期，很多同志对热气机的构造、性能、特点及其可能的应用范围很感兴趣，但又不很熟悉。本书编者多年来从事热气机的研究工作，搜集了大量资料，并汇编成这本读物。可以预见，本书的出版将进一步推动热气机的研究工作，在新的长征中起一个宣传鼓动作用。

沈岳瑞

1980年3月20日

目 录

第一章 热气机的类型及发展史	1
第一节 热气机的定义和分类	1
第二节 斯特林循环	3
第三节 热气机的基本结构类型	5
第四节 热气机的工作原理	8
第五节 双作用热气机	18
第六节 现代热气机的发展简史及现状	24
第二章 热气机的构造	52
第一节 热气机的组成	52
第二节 外部供热(燃烧)系统	53
第三节 闭式循环系统	60
第四节 活塞组和密封装置	80
第五节 第三代热气机的构造特点	95
第三章 循环分析及参数优选	102
第一节 施密特分析法	103
第二节 影响循环功的主要因素	113
第三节 热气机压缩比的选择	122
第四章 热气机的性能	128
第一节 有效效率	129
第二节 机械效率	131
第三节 示功循环效率	138
第四节 外燃系统效率	159
第五节 几点结论及讨论	165
第五章 热气机设计概论	182
第一节 概述	182
第二节 主要参数的确定	183
第三节 功率估算	191

第四节	循环效率和有效效率.....	208
第五节	冷却器和加热器容量.....	224
第六章	热气机的特性及应用	229
第一节	热气机的特性.....	229
第二节	热气机的应用.....	241
第三节	热气机在潜艇中的应用.....	251
第四节	结束语.....	270
参考文献	273

第一章

热气机的类型及发展史

第一节 热气机的定义和分类

在十八世纪七十年代英国人詹姆斯·瓦特发明的蒸汽机首次为人类提供了具有相当功率的原动机，引起了产业革命。但是，当时的蒸汽机的功率和效率都很低，而且铸铁气缸经常爆炸，很不安全。导致蒸汽机效率低的原因之一是水蒸汽在气缸中膨胀后要冷凝，这就增大了气缸壁的热损失。为了避免这一现象，提高蒸汽机的效率，在当时的条件下人们自然而然地想到用空气或别的气体来代替蒸汽充当热机的中间工质。热气机就是在这样的历史背景下发明的。那时，人们发明了下列三种类型的热气机。

1. 开式循环热气机

这种热气机有一个燃烧炉，从燃烧炉产生的热的燃烧气体和新鲜空气混合后引入活塞机中进行膨胀做功，膨胀后的气体排至外界。因为每一循环都需要供给新鲜空气和热的燃气，所以它极类似于燃气轮机循环（布雷顿循环），所不同的是工质的膨胀是在活塞机中完成的。1807年，乔治·凯莱(George Cayley)创建了第一台能实际工作的这种类型的热气机，当时叫做炉膛式热空气机。

2. 外部燃烧开式循环热气机

这种热气机的根本特点是，每一循环都需要供给新鲜空气，但作为中间工质的新鲜空气不与燃烧产物混合，而是由高温燃气对空气进行加热，经加热后的热空气在活塞机中膨胀做功，膨胀结束后排至外界。这种原理的热气机是约翰·埃里克森(John Ericsson)发明的，所以叫埃里克森循环热气机。因为埃里克森

循环的回热过程是在等压下进行的，又叫等压式热气机。1851年，埃里克森制成了 60 马力的热气机，接着在 1853 年他制成了超大型热气机，轰动一时。该机缸径 4.26 米，4 缸，总功率 300 马力，总效率 13%（比当时的蒸汽机高一倍），装在一艘排水量为 2000 吨的“埃里克森”号明轮机帆船上。

3. 外部燃烧闭式循环热气机

在这类热气机中，工质被封闭在一个闭式循环回路中，依靠活塞机的气缸容积的变化来控制工质在闭式回路中的流动方向。在较低的温度和压力下压缩工质，在较高的温度和压力下膨胀，而获得做功的能力。有一个外部燃烧（发热）装置对闭式回路中的工质进行加热，受热后的工质在活塞机中膨胀做功。膨胀后的工质不排至外界，而在下一个循环中再次进行加热和膨胀，工质用了又用是这类热气机的基本特点。这种原理的热气机是罗伯特·斯特林(Robert Stirling)在 1815 年发明的，故通常称之为斯特林发动机，并称它的循环过程叫做斯特林循环。图 1-1 是 1816 年斯特林发明的第一台热气机。这台热气机用在采石场上带动水泵工作。

由于当时技术水平的限制，上述三类热气机虽然风行一时，但都半途夭折了。近几十年来，第三种类型的热气机重新受到人们的重视，并得到了充分的发展，具有很大的竞争能力，是中、小型内燃机的可畏的竞争对手。

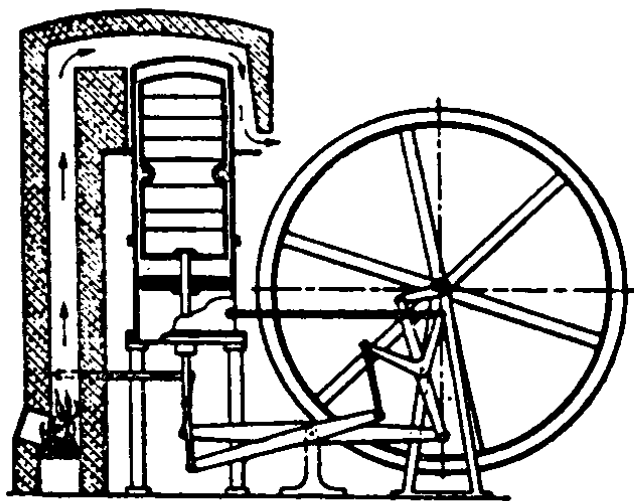


图1-1 斯特林发明的第一台热气机

热气机是一种活塞式发动机，它周期性地在较低的温度和压力下压缩某种气体(例如空气、氮气、氦气或氢气等)，并在较高的温度和压力下进行膨胀做功的机器。在现代热气机中，热气机

原则上只有两种基本结构类型，即配气活塞式热气机和双活塞式热气机，其他类型的热气机都是从这两种基本类型的热气机派生出来的。

第二节 斯特林循环

现代热气机的工作过程是按斯特林循环进行的。斯特林循环是一种理想循环，由两个等温过程和两个等容过程组成，如图 1-2 所示。工质首先进行等温压缩（图 1-2 中的过程 1-2），在过程 1-2 中，容积从 V_1 缩小到 V_2 ，但温度 T_C 是保持不变的。接着进行等容加热（过程 2-3），在过程 2-3 中，容积是保持不变的，即 $V_2=V_3$ ，但工质温度却从 T_C 升高到 T_E ，同时压力也升高。然后在较高的温度 T_E 下作等温膨胀（过程 3-4），在这一过程中，工质的容积从 $V_3=V_2$ 增大到 V_4 ，但温度 T_E 保持不变。最后，工质在容积不变的情况下等容冷却（过程 4-1），工质温度从 T_E 下降到 T_C ，压力同时下降到循环始点压力。至此，工质的容积、压力和温度都回复到循环始点的状态，完成一个循环。由于工质的加热和冷却是在等容下进行的，这种循环又叫等容回热循环。

为了比较起见，在图 1-2 中还示明了埃里克森循环（等压回热循环）和卡诺循环。埃里克森循环是由两个等温过程（图 1-2 中的 1-2'' 和 3-4''）和两个等压过程（2''-3 和 4''-1）组成的；卡诺循环是由两个等温过程（1-2' 和 3-4'）和两个等熵过程（2'-

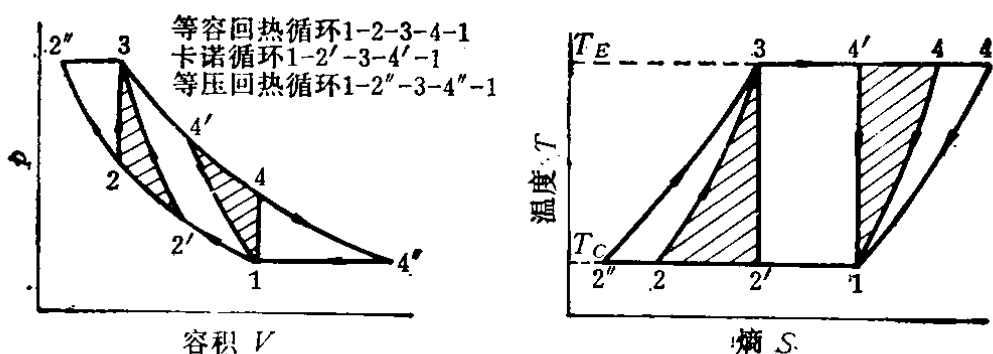


图1-2 斯特林循环（等容回热循环）与埃里克森循环（等压回热循环）与卡诺循环的比较

3 和 4'-1) 组成的。为清楚起见, 比较是在循环压力的上下限和循环温度的上下限相同的基础上进行的, 如图 1-2 所示。上述三种循环的特点是压缩和膨胀过程都是在等温下完成的, 在热力学上, 这三种循环的循环效率是相等的, 都等于卡诺循环的循环效率(简称卡诺效率)。卡诺效率的大小仅决定于两条等温线的绝对温度的比值, 即等于 $1 - (T_c/T_E)$, 与工质的种类和热机的结构无关。从热力学观点看, 卡诺循环是最有利的一种热力循环, 这是因为任何一种热机的热力循环效率都不可能高于具有相同循环温度比的卡诺效率。热气机的循环效率等于卡诺效率, 内燃机(汽油机和柴油机)的循环效率低于卡诺效率。

循环功的大小决定于 $p-V$ 图中由循环过程所组成的面积, 例如斯特林循环的循环功由面积 1-2-3-4-1 决定, 卡诺循环的循环功则由面积 1-2'-3-4'-1 决定。在同一个 $p-V$ 图中, 面积越大, 循环功也越大。在图 1-2 中可见, 在压力、容积和温度相同的情况下, 斯特林循环的循环功比卡诺循环的大。 $p-V$ 图中的阴影面积代表斯特林循环比卡诺循环多做的功, $T-S$ 图中的阴影面积则代表斯特林循环比卡诺循环所增大的与外界的热交换量。如果, 用循环过程中气缸容积最大变化值去除循环功, 即得一个极其重要的参数——平均指示压力, 它可以用来说明气缸做功能力的大小, 平均指示压力越高, 气缸做功能力越大(在第四章将详细介绍)。从图 1-2 中可见, 三种循环的平均指示压力, 在循环压力和温度相同的情况下, 斯特林循环所做的功最大。目前已制成的热气机每升气缸容积能产生 200 马力的功率, 这是内燃机达不到的。

若在活塞式发动机上实现埃里克森循环或卡诺循环, 困难是很大的, 只有斯特林循环的活塞式发动机得到了发展。因为只有斯特林循环热气机在现代热机的领域中具有最大的竞争能力, 而其他类型的热气机是没有什么发展前途的, 所以我们就将斯特林循环发动机简称为热气发动机, 或热气机。

斯特林循环的加热过程(即回热器的回热过程)是在等容下

进行的，斯特林循环又称等容回热循环。这种循环在热动力学上的可逆性是很大的，它既可以作为发动机，也可以作为热泵、冷风机和致冷机使用。如果我们将这种循环的活塞机与电动机、发电机连接成一个机组，首先活塞机由电动机按逆时针方向拖动，此时这种循环的活塞机成为致冷机。由于大气中的水份在气缸头（膨胀腔顶）上凝结而出现霜花，由于温度的进一步下降，空气就在气缸头外侧液化。然后脱开电动机，它就成了冷气机（冷风机），但此时活塞机的转向相反，即按顺时针方向转向。其结果是气缸头上的温度逐渐升高，两个腔室（热腔和冷腔）的温差逐渐缩小，最后当温差为零时停车。然后再由电动机按顺时针方向拖动，气缸头由于热量的大量积蓄而发红，此时如果通入冷空气使其流过气缸头，该空气则受热，此时活塞机可作为致热机使用。当气缸头受热发红后脱开电动机，发动机按逆时针转动，成为热气机，并拖动发电机发电。上述斯特林循环的各种应用是仅从热动力学的角度进行解释的，在实际应用场合当然无法使一台斯特林循环活塞机既作为致冷机，同时又作为热气机使用。本书仅介绍作为原动机使用的斯特林循环发动机——热气机。

第三节 热气机的基本结构类型

要实现等容回热循环，即要实现等温压缩，必须有一个压缩腔，在热气机中叫做冷腔，并设置能将压缩热从被压缩的工质中导出的设备——工质冷却器；要实现等温膨胀，必须有一个膨胀腔，在热气机中叫做热腔，并设置使工质作等温膨胀的供热设施——工质加热器；要实现等容加热，通常有一个回热器[●]。显然，为了使循环的回热过程（加热和冷却过程，图 1-2 中的过程 2-3

● 在理论上，等容加热不一定要通过回热器来实现，只要使工质在膨胀始点的温度达到循环的最高温度（图 1-2 中的点 3，温度 T_E ），使压缩始点的温度达到循环的最低温度（图 1-2 中的点 1，温度 T_C ）即行。回热器事实上是个节能器，对循环过程来说，它并不是不可缺少的。

和 4-1) 在等容下进行, 热腔和冷腔应有两个活塞分别控制, 并按循环的要求进行动作。由此可见, 要实现斯特林循环, 循环系统应当由下列五部分组成: 热腔、加热器、回热器、冷却器和冷腔, 它们成了现代热气机循环系统的不可缺少的组成部分。

在现代热气机中, 只有两种基本结构类型, 即双活塞式热气机和配气活塞式热气机, 如图 1-3 (1), (2) 所示。

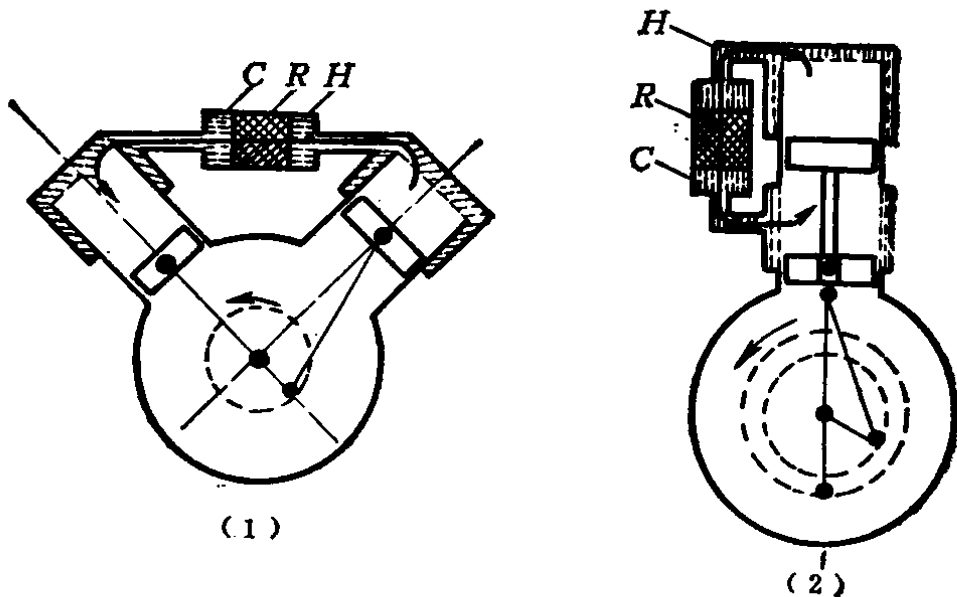


图1-3 双活塞式热气机和配气活塞式热气机
C—冷却器; R—回热器; H—加热器。

1. 双活塞式热气机

这类结构的热气机有两个呈 V 形或对置布置的气缸, 两个活塞分别置入这两个气缸中。靠近冷却器一侧的气缸叫冷缸, 活塞叫冷活塞, 组成冷腔。靠近加热器一侧的活塞叫热活塞, 气缸叫热缸, 组成热腔。热腔、加热器、回热器、冷却器和冷腔依次串联在一起, 组成一个完整的循环回路。热腔和加热器处于循环的高温部分, 因此通常称它们为热区; 冷腔和冷却器在循环过程中处于循环的低温部分, 称为冷区; 回热器的一端位于热区, 具有热区的温度, 另一端位于冷区, 具有冷区的温度。在循环过程中, 工质的压缩过程主要发生在冷腔, 因而冷腔有时也叫压缩腔, 冷活塞叫压缩活塞, 并主要传递压缩功。同理, 工质的膨胀过程主要发生在热腔, 因此热腔也称为膨胀腔, 热活塞叫膨胀活塞, 传

递膨胀功。因为冷、热活塞在循环过程中都能传递功率，故这种类型的热气机叫双活塞式热气机。

2. 配气活塞式热气机

这类结构的热气机只有一个气缸，其内置有两个活塞。靠近加热器一侧的活塞叫配气活塞，靠近冷却器一侧的活塞叫动力活塞。配气活塞的上方叫热腔（膨胀腔），配气活塞下方与动力活塞上方所组成的腔室叫冷腔（压缩腔）。热腔、加热器、回热器、冷却器和冷腔串联在一起，形成一个完整的循环回路。同样，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。因为配气活塞上下端的压力是一致的，所以它既不向外界输出功，也不从外界接受功，其功用是使工质在循环回路中来回流动，故有配气活塞之称。因为工质的来回流动是由配气活塞完成的，所以称为配气活塞式热气机。这类热气机的一个特点是，热腔是由配气活塞（热活塞）单独控制的，而冷腔则是由配气活塞和动力活塞联合控制的。

上述两种类型热气机的共同特点是，循环回路由冷腔、冷却器、回热器、加热器和热腔组成。冷腔和冷却器组成冷区，在循环过程中始终保持循环的最低温度 T_c ，见图 1-2。冷区是工质发生压缩的地方，如果导出工质压缩热的冷却器的冷却能力为无穷大，则压缩在等温下进行。加热器和热腔组成循环的热区，在循环过程中始终保持循环的最高温度 T_E 不变，见图 1-2。热区是工质产生膨胀的部位，如果加热器的加热工质的能力为无穷大，则膨胀在等温下进行。回热器是个节能装置，当等温膨胀后的工质（温度为 T_E ）从热区返回冷区流经回热器时，回热器吸收了工质的部分热量，使工质的温度从 T_E 下降到 T_c ，如图 1-2 中的等容冷却过程 4-1。当工质从冷区流向热区时，工质流过回热器的过程中，工质从回热器获得热量，使工质的温度从 T_c 升高到 T_E ，如图 1-2 中的等容加热过程 2-3 所示。

上述两类热气机的另一个共同特点是，热活塞的运动必须领

先于冷活塞一定的曲轴转角，只有在这种情况下，才能使工质在闭式循环回路中按热动力过程的要求来回流动。热活塞领先于冷活塞的曲轴转角叫活塞领先角，这是个对热气机性能颇有影响的结构参数，在后面还要详细介绍。

第四节 热气机的工作原理

在这一节中，将介绍热气机完成一个循环的动作过程以及理想循环和实际循环的差别。在讨论理想循环过程时有下列简化假设：

- 在压缩过程中全部工质处于冷腔；
- 在膨胀过程中全部工质处于热腔；
- 冷却器和加热器的热容量为无穷大；
- 回热器的工作是完美的，效率等于 1；
- 工质总量不变，即无漏泄；
- 无工质的流动摩擦损失，即循环系统中各点的瞬时压力都是一致的；
- 工质为理想气体；
- 活塞的运动不连续；
- 忽略冷却器、加热器和回热器的容积。

1. 配气活塞式热气机的工作原理

图 1-4 所示为配气活塞式热气机循环过程的活塞相位(位移)图，图中同时示明了冷腔容积 V_c 和热腔容积 V_B 与活塞相位的关系。循环的四个过程如下：

等温压缩过程 1-2 压缩开始时，动力活塞处于下止点，配气活塞位于上止点（图 1-4 中的活塞相位 I 所示），此时工作腔容积最大，温度最低，压力最小，即 $V_1 = V_{\max}$, $T_1 = T_{\min} = T_c$, $p_1 = p_{\min}$ 。在压缩过程 1-2 的期间内，配气活塞在上止点保持不动，动力活塞从下止点向上止点运动，工作腔容积随着动力活塞的向上运动而逐渐变小，工质被压缩，压力也随之逐渐增大。压缩热由冷却

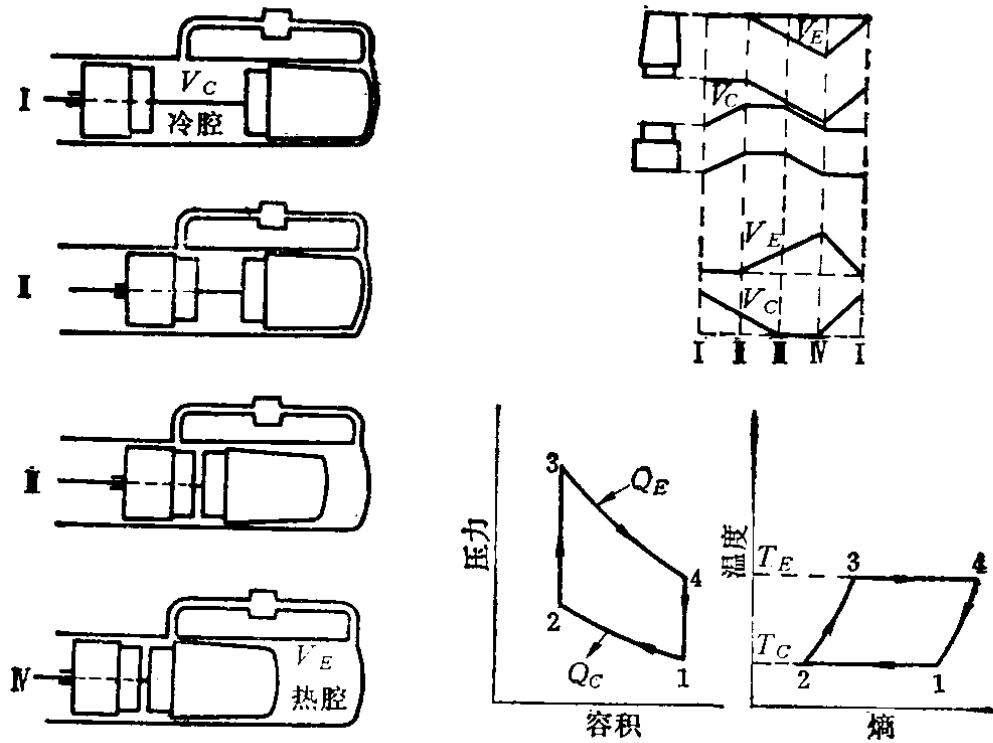


图1-4 配气活塞式热气机工作原理

器导至外界，而保持温度 T_c 不变，实现等温压缩。待动力活塞运动到上止点后压缩过程结束（相位 II），此时工作腔容积最小，即 $V_2 = V_{\min}$ 。为在恒定的温度 T_c 下实现等温压缩，工质必须通过冷却器向外界释出压缩热 Q_c ；同时，在压缩过程中外界必须对工质做功，外界所输入的压缩功 W_{1-2} 等于工质在等温压缩下向外界释出的热量 Q_c ，工质内能不变，而熵减小。根据理想气体特性方程可得：

$$p_2 = p_1 (V_1 / V_2)$$

$$Q_c = W_{1-2} = MRT_c \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (1-1)$$

式中 M ——工质质量；

R ——气体常数。

熵的减小量 ΔS_1 为

$$\Delta S_1 = S_2 - S_1 = MR \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (1-2)$$

等容加热过程 2-3 从相位 II 开始，到相位 III 结束。在这一过程中动力活塞在上止点保持不动，配气活塞向下止点运动，至相位

Ⅲ过程结束。由于动力活塞保持不动，不论配气活塞如何运动，工作腔容积始终不变（配气活塞向下移动时，活塞上端增大的容积等于下端减少的容积，即热腔所增加的容积等于冷腔缩小的容积），即 $V_3 = V_2 = V_{\min}$ 。配气活塞从上止点向下止点运动的结果，工质从冷腔流入热腔，在流经回热器时工质从回热器获得热量 Q_R ，使工质温度从 T_2 升高到 T_3 ，而 $T_3 = T_E$ ，压力也相应地从 p_2 升高到 p_3 ，但容积不变，实现了等容加热。在这一过程中，工质与外界无热交换，也不做功，但工质的内能和熵都增大。根据理想气体特性方程可得：

$$p_3 = p_2(T_3/T_2) = p_2/\tau$$

$$\tau = T_2/T_3 = T_C/T_E \quad \text{叫循环温度比}$$

$$V_3 = V_2 = V_{\min}$$

回热器传给工质的热量 Q_R 为

$$Q_R = MC_V(T_3 - T_2) = MC_V(T_E - T_C) \quad (1-3)$$

式中 C_V 为 $T_C \sim T_E$ 范围内的等容比热。

熵的增大量 ΔS_2 为

$$\Delta S_2 = S_3 - S_1 = MC_V \ln \frac{1}{\tau} \quad (1-4)$$

等温膨胀过程 3-4 在这一过程中，工质在最高循环温度 T_E 下完成等温膨胀，并向外界做功。膨胀开始时（相位Ⅲ），配气活塞继续向下止点运动，而动力活塞也从其上止点向下止点运动，过程结束时两个活塞同时到达下止点（相位Ⅳ）。由于动力活塞从上止点运动到下止点，工作腔容积从 $V_3 = V_{\min}$ 增大到 $V_4 = V_{\max}$ 。工质在最高的循环温度 $T_3 = T_4 = T_E = T_{\max}$ 的状态下完成等温膨胀，必须由加热器从外界向工质提供热量 Q_E 。工质在膨胀过程中向外界做功，其值 W_{3-4} 等于外界供给工质的热量 Q_E 。工质内能不变，但熵增大。根据理想气体特性方程可得：

$$p_4 = p_3(V_3/V_4) = p_1/\tau$$