

高等学校试用教材

活塞式压缩机原理

西安交通大学 林梅 编
孙嗣莹

GAO DENG XUE
XIAD JIAO CAI

机械工业出版社

压缩机在国民经济中用途极广。本书系统地阐述了活塞式压缩机的热力学基础、工作过程、动力学、结构方案、级间流动能量损失及压缩机的模拟计算等问题。

本书与另一教材《活塞式压缩机结构》相互衔接，是高等学校“活塞式压缩机原理”课程的教材，也可供从事压缩机研究、设计、制造的工程技术人员参考。

活塞式压缩机原理

西安交通大学 林梅 编
孙嗣莹

*
责任编辑：王存新

*
机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*
开本 787×1092¹/₁₆·印张 15³/₄·字数 382 千字

1987年11月北京第一版·1987年11月北京第一次印刷

印数 0,001—2,000·定价：2.65 元

*
统一书号：15033·7128

前 言

本书是在1981年1月出版的高等学校试用教材《活塞式压缩机》的基础上,根据1984年5月高等学校流体动力机械教材分编审委员会制订的新教学计划和教学大纲,以及审定的编写大纲编写的。

根据新教学大纲要求,将原来的《活塞式压缩机》分成《活塞式压缩机原理》和《活塞式压缩机结构》两门课程,为此编写了相应的教材。

《活塞式压缩机原理》这本书共分十一章,系统地介绍了活塞式压缩机的热力学原理、工作过程、动力学以及结构方案等问题,并增加了压缩机中气体流动能量损失及压缩机的模拟计算等。

书中采用了法定计量单位,但为了从工程单位制过渡方便起见,压力均以 $1\text{ kgf/cm}^2 = 10^5\text{ Pa}$ 代替,且在无特别说明时,均指绝对压力;排气量单位为 m^3/min ,转速单位为 r/min 。

本书是高等学校活塞式压缩机专业《活塞式压缩机原理》课程的教材,也可供制冷、化工专业的师生及从事压缩机研究、设计和制造的工程技术人员参考。

本书由西安交通大学压缩机教研室林梅、孙嗣莹编写,其中林梅编写第一、四、五、六、七章及第九章的第一、二节,孙嗣莹编写其余部分。本书由石华鑫教授审稿,他对本书提出了很多的宝贵意见,特此向他表示感谢。

在本书的编写过程中,得到了华中工学院、合肥通用机械研究所、上海压缩机厂、沈阳气体压缩机厂、北京第一通用机械厂、杭州制氧机厂、蚌埠空气压缩机厂等单位的大力协助,特此致谢。

由于编者水平有限,难免存在一些错误和缺点,欢迎读者批评指正。

作者

1986年8月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 压缩机的用途	1
第二节 压缩机的种类及其应用范围	4
第三节 活塞式压缩机的分类	12
第二章 热力学基础	16
第一节 理想气体的性质与热力过程	16
第二节 实际气体的性质与热力学基本关系式	21
第三节 压缩机级的理论循环	28
第四节 温熵图和焓熵图的应用	34
第五节 变质量系统热力学基础	36
第三章 压缩机级的实际循环	42
第一节 级的实际循环指示图	42
第二节 进气系数	46
第三节 级的实际循环指示功	52
第四节 多级压缩	57
第四章 压缩机的主要热力性能参数	65
第一节 排气量	65
第二节 排气压力	73
第三节 排气温度	75
第四节 压缩机的功率和效率	77
第五章 压缩机的非额定工况	82
第一节 单级压缩机排气量调节工况	82
第二节 多级压缩机调节工况下的压力重分配	88
第三节 多级压缩机级间压力的复算	92
第六章 压缩机中的作用力	94
第一节 曲柄连杆机构的运动关系	94
第二节 曲柄连杆机构中的作用力	98
第三节 单列压缩机中作用力的分析	104
第四节 切向力曲线与飞轮矩的确定	108
第五节 动力计算的图解计算法	117
第七章 压缩机惯性力的平衡	125
第一节 单列压缩机惯性力的平衡	125
第二节 多列压缩机惯性力的平衡	127
第三节 利用矢量图研究压缩机的惯性力平衡	141
第四节 旋转惯性力矩的平衡	144

第五节 基础和减振	147
第八章 压缩机方案设计	153
第一节 压缩机方案分析	153
第二节 压缩机的主要结构参数	161
第三节 方案实例	167
第四节 驱动机的选择	172
第九章 压缩机中的气体流动能量损失	174
第一节 气体流经全开气阀时的压力损失	174
第二节 阀片运动规律对气阀压力损失的影响	183
第三节 管路中的能量损失	186
第十章 压缩机工作过程模拟	194
第一节 数学模拟概论	194
第二节 压缩机工作过程模拟的数学模型	195
第十一章 热力及动力计算实例	206
第一节 正常性热力计算	206
第二节 复算性热力计算	217
第三节 动力计算实例——图解法	221
附录	230
附录一 常用气体物理性质表	230
附录二 各种温度时的水蒸汽饱和蒸汽压及密度表	231
附录三 常用气体压缩因子 Z 值曲线图	232
附录四 按对比态两参数作成的 Δc_p 、 Δc 曲线图	239
附录五 X 、 Y 曲线图	240
附录六 机械工业部石化通用机械工业局企业标准 JB/TQ392—85《动力用空气压缩机质量 分级》	241
附录七 机械工业部部标准 JB2589《容积式压缩机型号编制方法》(草案)	243
参考文献	245

第一章 绪 论

压缩机是用来提高气体压力和输送气体的机械。从能量的观点来看，压缩机是属于将原动机的动力能转变为气体压力能的工作机。它的种类很多，用途极广，故有“通用机械”之称呼。本章将介绍压缩机在国民经济中的广泛应用、压缩机的种类等。

第一节 压缩机的用途

随着科学技术的发展，近年来，特别是石油化工的发展，压力能的应用日益广泛，使得压缩机在国民经济的各个部门中成为必不可少的关键设备之一。下面就压缩气体使用的目的不同，将压缩机在国民经济中的应用分成下面四个方面：

一、动力用压缩机

利用压缩空气作为动力风源，具有安全、经济、效率高的特点。因此，在机械、矿山、建筑等工业中广泛利用压缩空气来驱动各种风动工具（如风镐、风钻、气力扳手、气力喷砂等），压力一般在 $(6 \sim 15) \times 10^5 \text{Pa}$ 。用来控制仪表及自动化装置时其压力为 $6 \times 10^5 \text{Pa}$ 。交通运输业中利用压缩空气制动车辆、启闭门窗，压力为 $(2 \sim 10) \times 10^5 \text{Pa}$ 。食品、制药工业中利用压缩空气来搅拌浆液，压力为 $(2 \sim 6) \times 10^5 \text{Pa}$ 。纺织工业中利用压缩空气吹送纬纱以代替梭子，压力为 $(1 \sim 2) \times 10^5 \text{Pa}$ 。此外，大中型发动机的启动，压力为 $(25 \sim 60) \times 10^5 \text{Pa}$ ；油井压裂，压力为 $150 \times 10^5 \text{Pa}$ ；高压空气爆破采煤，压力为 $800 \times 10^5 \text{Pa}$ 。鱼雷发射，潜艇沉浮及沉船打捞，医院中的气垫床、气垫椅，旅游业中的气垫船等等，均需用到不同压力的压缩空气。在这些部门中，空气压缩机就成为必不可少的设备。

图 1-1 是动力用空气压缩机的照片图。

二、化工工艺用压缩机

在化学工业中，将气体压缩至高压，有利于化学反应。例如，化肥生产中的合成氨是由氮气和氢气在合成塔中的高压下合成而得。因此，根据工艺流程的不同：其中低压流程为 $(150 \sim 200) \times 10^5 \text{Pa}$ 、中压流程为 $(300 \sim 450) \times 10^5 \text{Pa}$ 、高压流程为 $(800 \sim 1000) \times 10^5 \text{Pa}$ ，而且需要提供相应压力的氮氢气压缩机，以提高氮、氢气的压力后送入合成塔；在合成塔中未能合成的氮、氢气，则需要经循环压缩机再次提高压力后送入合成塔。

尿素则由二氧化碳和氨合成，合成压力常为 $210 \times 10^5 \text{Pa}$ ，因此就需要用二氧化碳压缩机。

塑料、人造纤维、人造橡胶等化工产品的基础原料高压聚乙烯是将乙烯压缩到 $2800 \times 10^5 \text{Pa}$ 聚合而成，因此就离不开超高压聚乙烯压缩机。

石油的精炼，常要把氢加热加压后与油反应，才能使碳氢化合物之重组分裂化成轻组分的碳氢化合物，常用的氢气压缩机有 $(70 \sim 90) \times 10^5 \text{Pa}$ 、 $150 \times 10^5 \text{Pa}$ 、 $320 \times 10^5 \text{Pa}$ 三种。

总之，各种气体压缩机是化学工业极为重要的关键设备之一，常被比喻为人体的心脏。

图 1-2 是大型化工厂中的压缩机装置。

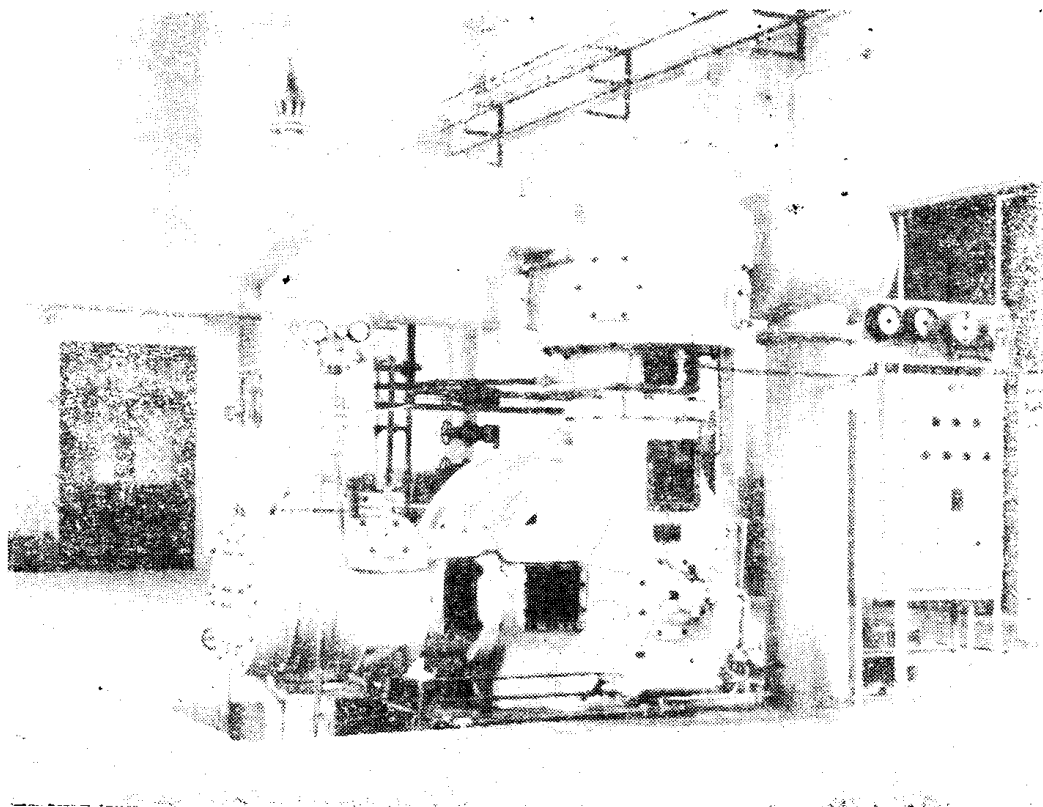


图1-1 动力用空气压缩机

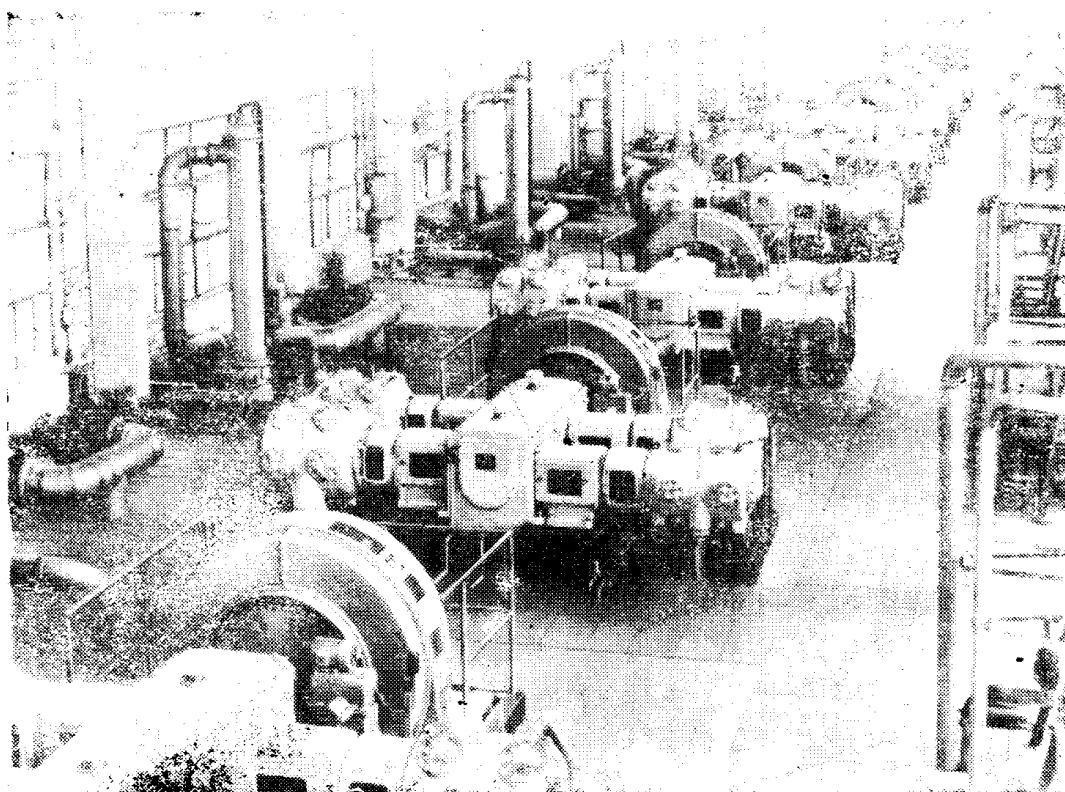


图1-2 大型化工厂中的压缩机装置

三、制冷和气体分离用压缩机

气体经压缩后送入冷凝器，使之变成液体，若再膨胀至低压，液体经蒸发而吸热，可达到制冷目的。若液化的气体为混合气体，则可根据其各组分的不同气化温度，而将其分离出来，得到各种纯度的气体。因此，压缩机是制冷装置和气体分离设备中的主机。

冰箱、冷库、空调器都是常见的制冷装置。它们可按制冷工质不同，常使用氨压缩机或氟里昂压缩机等等。制冷用压缩机的压力大都为 $(8 \sim 12) \times 10^5 \text{Pa}$ 。

最常见的气体分离设备是将空气分离以得到氧和氮，即所谓空分设备，需要有空压机和氧压机。空气分离分低压流程，压力为 $(5 \sim 6) \times 10^5 \text{Pa}$ ；中压流程，压力为 $(15 \sim 25) \times 10^5 \text{Pa}$ ；高压流程，压力为 $(150 \sim 220) \times 10^5 \text{Pa}$ 。相应的空压机所应达到的气体压力与其流程压力相对应。

图 1-3 为制冷用压缩机的照片图。

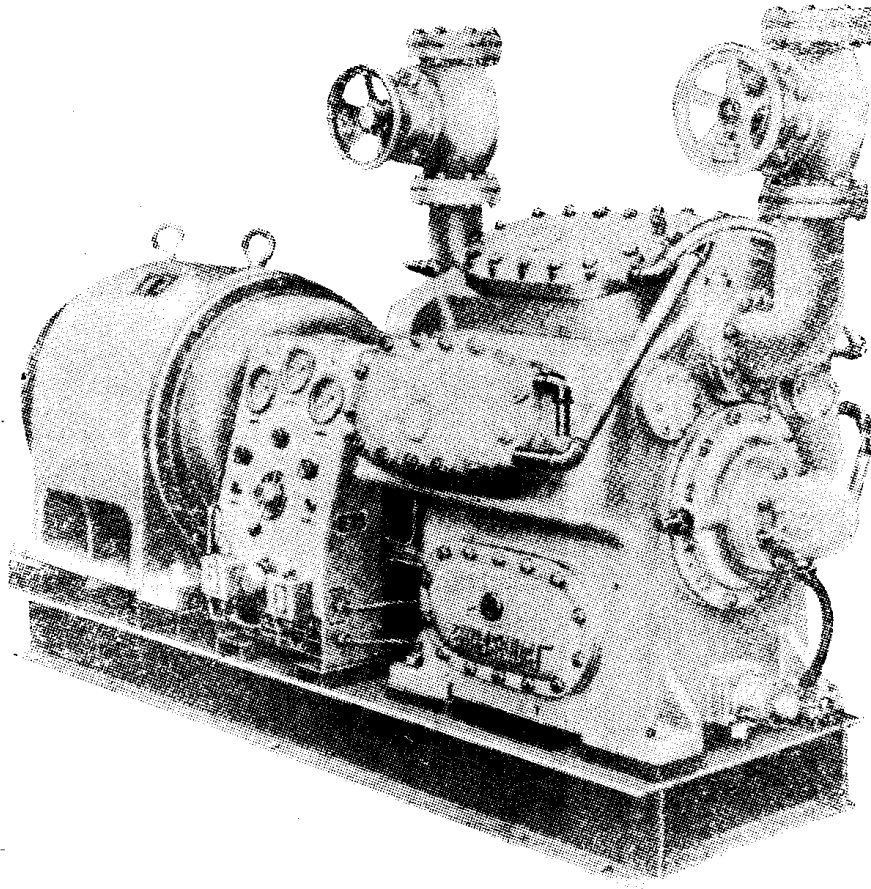


图1-3 制冷用压缩机

四、气体输送用压缩机

在石油、化工生产中，常利用管道输送气体，则需用压缩机增压，以克服流动过程中的管道阻力。这种压缩机的压力，视其管道长短而定。远程输送煤气时，压力可达 $30 \times 10^5 \text{Pa}$ 。最典型的是输送天然气用的摩托压缩机（图 1-4）。

当利用有限的容积输送较多量的气体时，可利用压缩机将气体压力提高后，以较小的体积注入瓶中，达到装瓶输送气体的目的。气体装瓶输送用压缩机的压力视其装瓶压力而定。

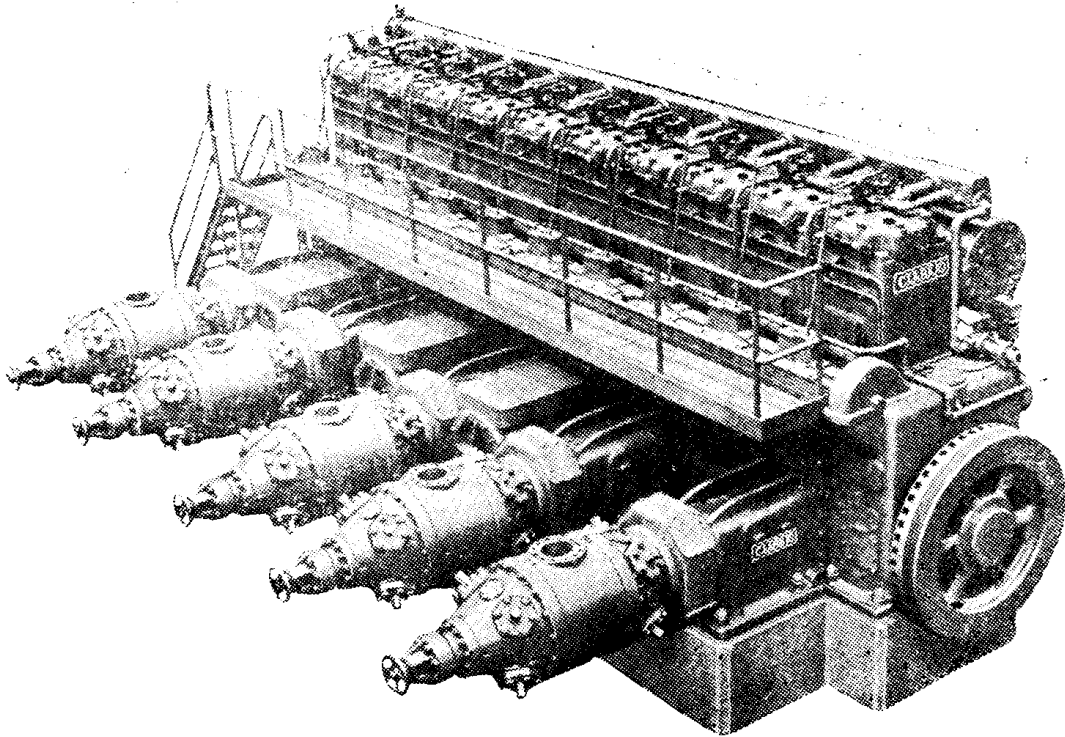


图1-4 摩托压缩机

例如，氧气装瓶压力为 $150 \times 10^5 \text{Pa}$ ，乙烯气装瓶压力为 $(10 \sim 15) \times 10^5 \text{Pa}$ ，二氧化碳装瓶压力为 $(50 \sim 60) \times 10^5 \text{Pa}$ ，石油液化气装瓶压力为 $(5 \sim 15) \times 10^5 \text{Pa}$ 。

综上所述，压缩机的用途极广，几乎国民经济的各个部门都有应用。

第二节 压缩机的种类及其应用范围

一、压缩机的种类

按照压缩气体的方式不同，压缩机通常分为两大类，一类是容积式压缩机；另一类是动力式压缩机。

若再考虑结构上的特点，国际标准ISO5390—1977将压缩机分成如图1-5所示各类。

现就压缩机的主要形式分别介绍如下：

(一) 容积式压缩机

这一类压缩机中，气体压力的提高是由于压缩机中气体的容积被缩小，使被压缩容积内的气体分子的密度增加而形成。

1. 往复式压缩机 最典型的往复式压缩机是活塞式压缩机，图1-6为其简图。它是由气缸4和活塞5，以及驱动活塞运动的连杆6和曲轴7（曲柄连杆机构）、控制气体进出的进、排气阀1、2组成。

当曲轴旋转时，通过连杆的传动，活塞便作往复运动，由气缸内壁、气缸盖和活塞顶面所构成的工作容积则会发生周期性变化。活塞从气缸盖3处开始向右运动时，气缸内的工作容积逐渐增大，这时，气体即沿着进气管、推开进气阀1而进入气缸，直到工作容积变得最大时为止，进气阀关闭；活塞向左运动时，气缸内工作容积缩小，气体压力升高，当气缸内压

压缩机

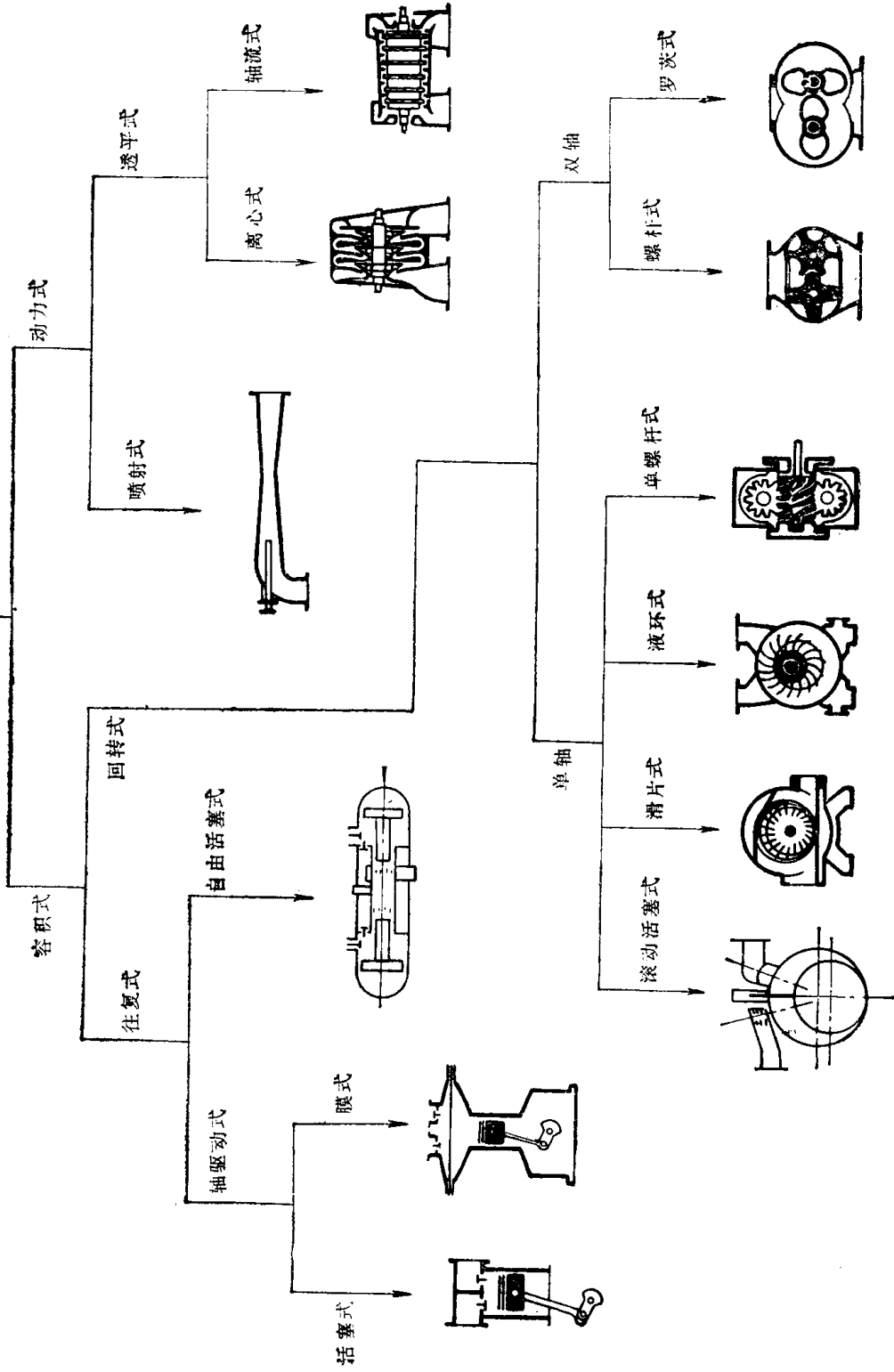


图1-5 压缩机的分类

力达到并略高于排气压力时，排气阀 2 打开，气体排出气缸，直到活塞运动到最右位置为止，排气阀关闭。当活塞再次向右运动时，上述过程重复出现。总之，曲轴旋转一周，活塞则往返一次，气缸内相继实现进气、压缩、排气的过程，即完成一个工作循环。这类压缩机目前应用最广。

活塞的往复运动除应用曲柄连杆机构外，还可以应用偏心机构(图 1-7 a)和斜盘机构(图 1-7 b)等。它们具有结构紧凑、重量轻的特点，但是均因尺寸不宜做得过大而只能用于微、小型压缩机中。

此外，还有不需要任何机械机构来推动活塞运动的压缩机。例如，当原动机为二冲程柴油机时，可直接将压缩机活塞 2 与柴油机活塞 1 相连(图 1-8)，柴油机工作时，其活塞直接推动压缩机活塞，这种被称为自由活塞式压缩机，它结构紧凑，但运转不易稳定，制造水平和运转管理水平都要求较高，目前尚不普遍。

又如，利用电磁作用直接产生活塞的往复运动，即为电磁振动式压缩机，如图 1-9 所示。图中中间部位为电动机，两端则为压缩机。这种压缩机结构紧凑，但也因制造工艺复杂，只在小型制冷压缩机中采用。

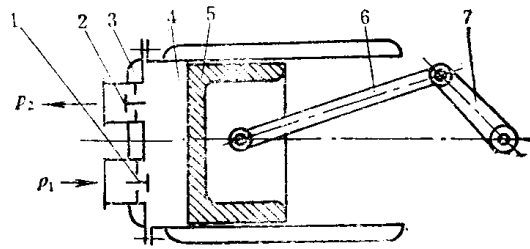


图1-6 活塞式压缩机简图

1—进气阀 2—排气阀 3—气缸盖 4—气缸 5—活塞 6—连杆
7—曲轴

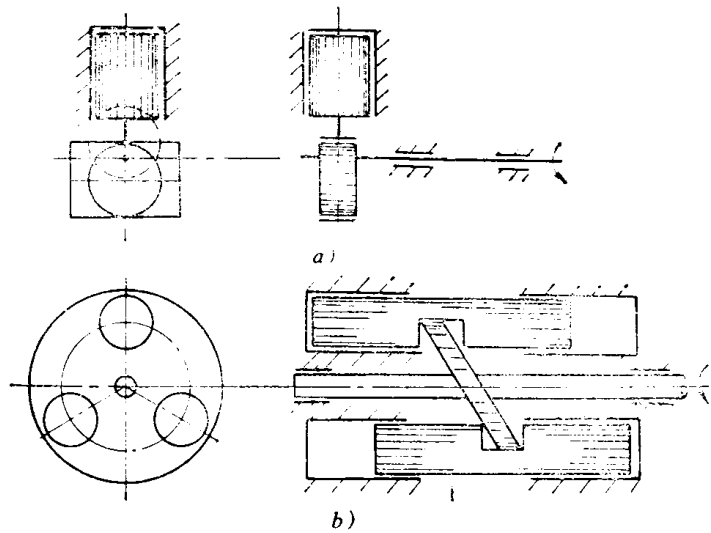


图1-7 偏心机构(a)和斜盘机构(b)

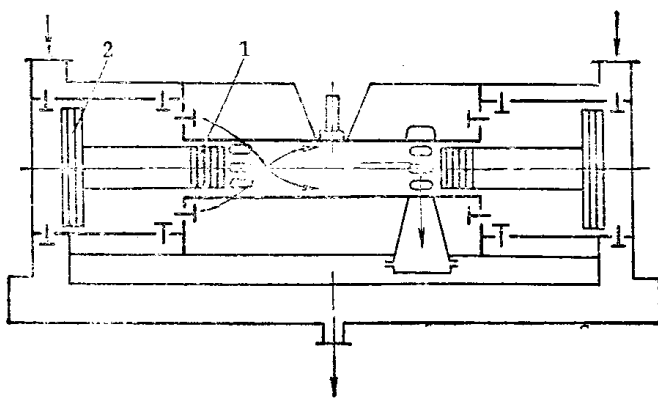


图1-8 自由活塞式压缩机

1—柴油机活塞 2—压缩机活塞

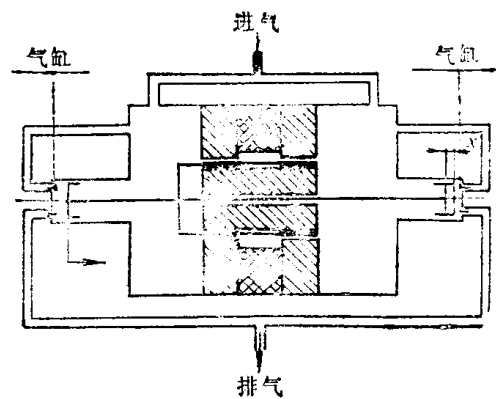


图1-9 电磁振动式压缩机

还有一种利用膜片的变形，而使气缸工作容积发生周期性的变化，如图 1-10 所示，被称

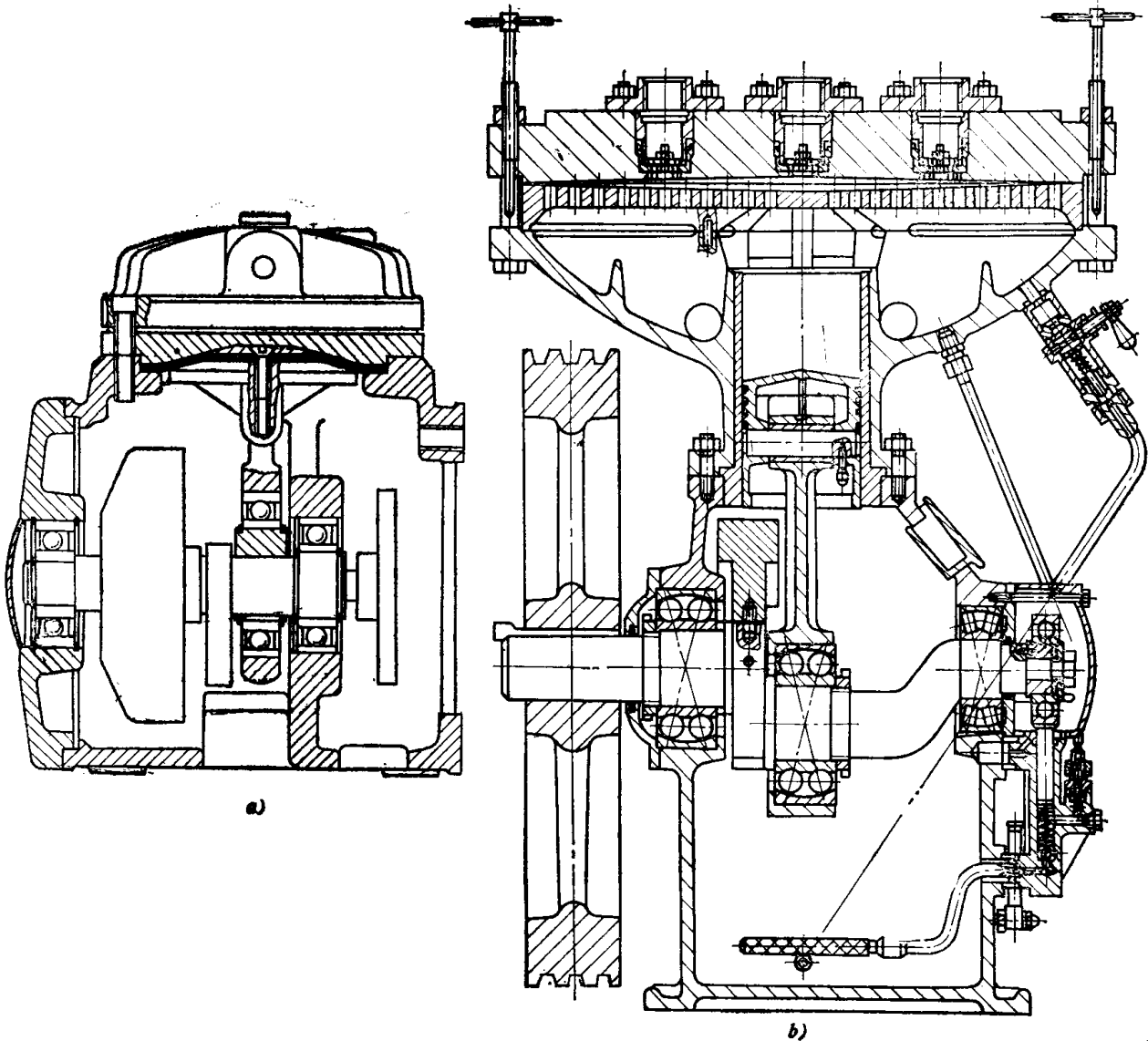


图1-10 膜式压缩机

a) 机械驱动式 b) 液压驱动式

为膜式压缩机。它仍有曲柄连杆机构，或者说仍有活塞式压缩机的主体结构，但其活塞的作用已被膜片的变形所代替。图 1-10 a 是一种靠机械驱动，而使膜片变形的，并造成膜片上方的容积变化，借以完成气体进气、压缩、排气的过程。当功率较大时，则可采用液压驱动式，如图 1-10 b 所示。这时，活塞上方充满着油液，活塞作往复运动时，靠油液促使膜片变形。在这种压缩机中，被压缩的气体并不与油接触，所以压缩气体的纯洁度极高，故多用于压缩那些不得为油所污染的贵重气体。

2. 回转式压缩机 回转式压缩机多是有—两个转子在气缸内作旋转运动，并引起气缸内工

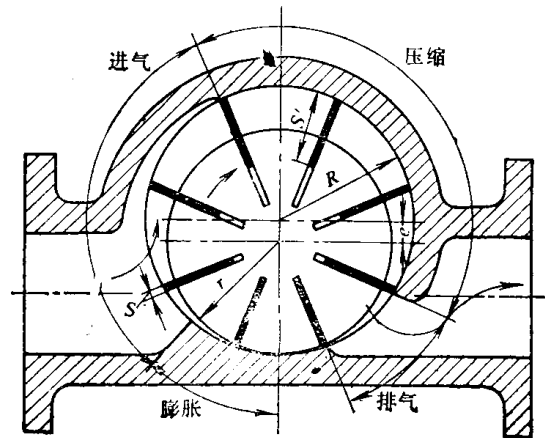


图1-11 滑片式压缩机

作容积周期性变化。与往复式压缩机不同之处是其工作容积在变化过程中，其空间位置也在变更，因此只要在气缸上合理地配置进气口和排气口，就可实现进气、压缩和排气过程，而且多半可以不安装气阀。

按照转子的结构特点，回转式压缩机可有多种形式。比较常用的是滑片式和螺杆式压缩机等等。

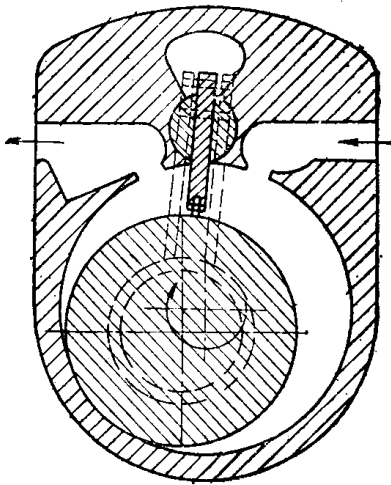


图1-12 滚动活塞式压缩机

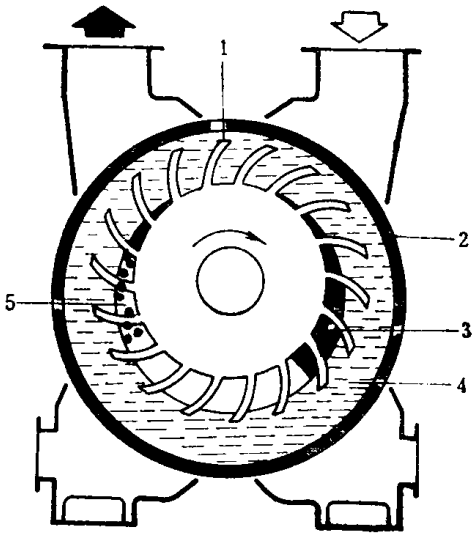


图1-13 液环式压缩机

1—叶轮 2—气缸 3—进口 4—工作液体
5—出口

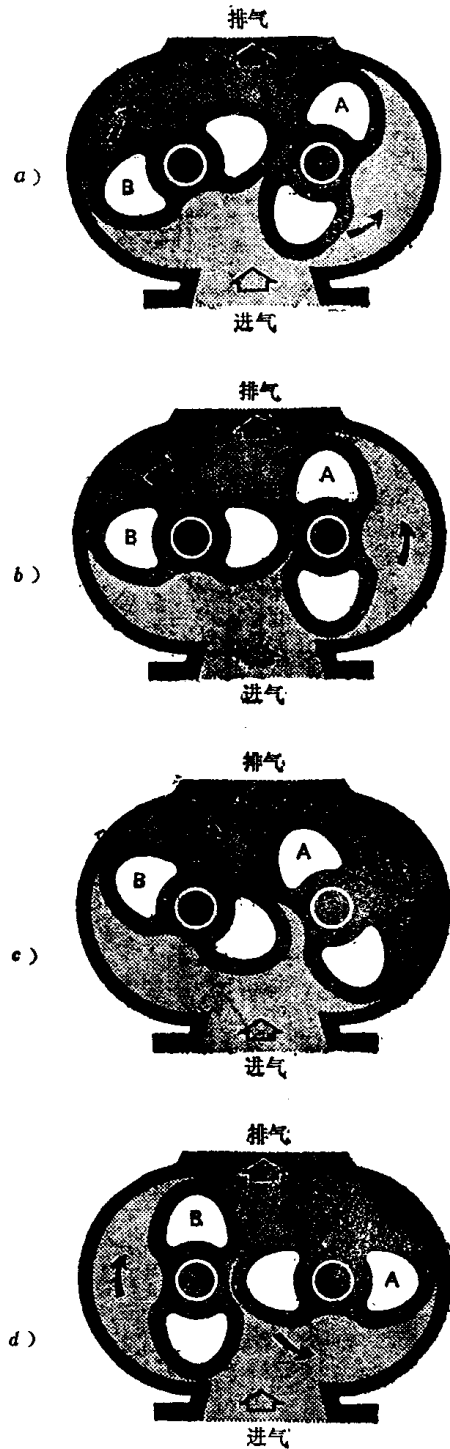


图1-14 两转子式罗茨鼓风机工作原理图

滑片式压缩机如图 1-11 所示。它在圆筒形气缸内偏心地安置一个圆柱形转子，转子中配有若干径向滑动的滑片，转子转动时，滑片随着运动，并在离心力作用下压向气缸内壁，

从而使每相邻的两个滑片和气缸内壁、转子外表面之间组成一个工作容积，工作容积数即等于滑片数，在转子的每一转中，它们依次地会由最小变为最大，又由最大变为最小，完成一次工作循环。

当滑片数减少到只有一片时，就成为如图 1-12 所示的机器。只不过此时滑片不随转子运动，只能在槽内滑动，而转子沿气缸表面作滚动运动，故常被称为滚动活塞式压缩机。

还有利用外围的液体表面与有关壁面组成工作容积的所谓液环式压缩机，如图 1-13 所示。它的外形虽然与一般滑片式压缩机相同，但由于液环的能量交换是一般滑片式所没有的，故成为另一类的回转式压缩机。

两个转子以上的回转式压缩机中，比较早的产品是罗茨鼓风机，其工作原理如图 1-14 所示。它是靠“8”字形转子相对旋转，由低压端将气体吸进气缸，不经内压缩送至高压端而排出。这种机器还有三转子式和四转子式，转子有直线形和扭曲形的。

当两转子的外形呈一对相互啮合的螺旋状转子时，则称为螺杆式压缩机，如图 1-15 所示。其气缸也呈“8”字形，这对相互啮合的转子中，其凸形的称为阳转子，凹形的称为阴转子，齿数有 4:6、3:5 等。工作时两转子反向旋转，阴转子的凹槽与气缸内壁所构成的容积因阳转子凸齿的侵入而不断变化，从而气体便由一端吸入，经压缩而由另一端排出。

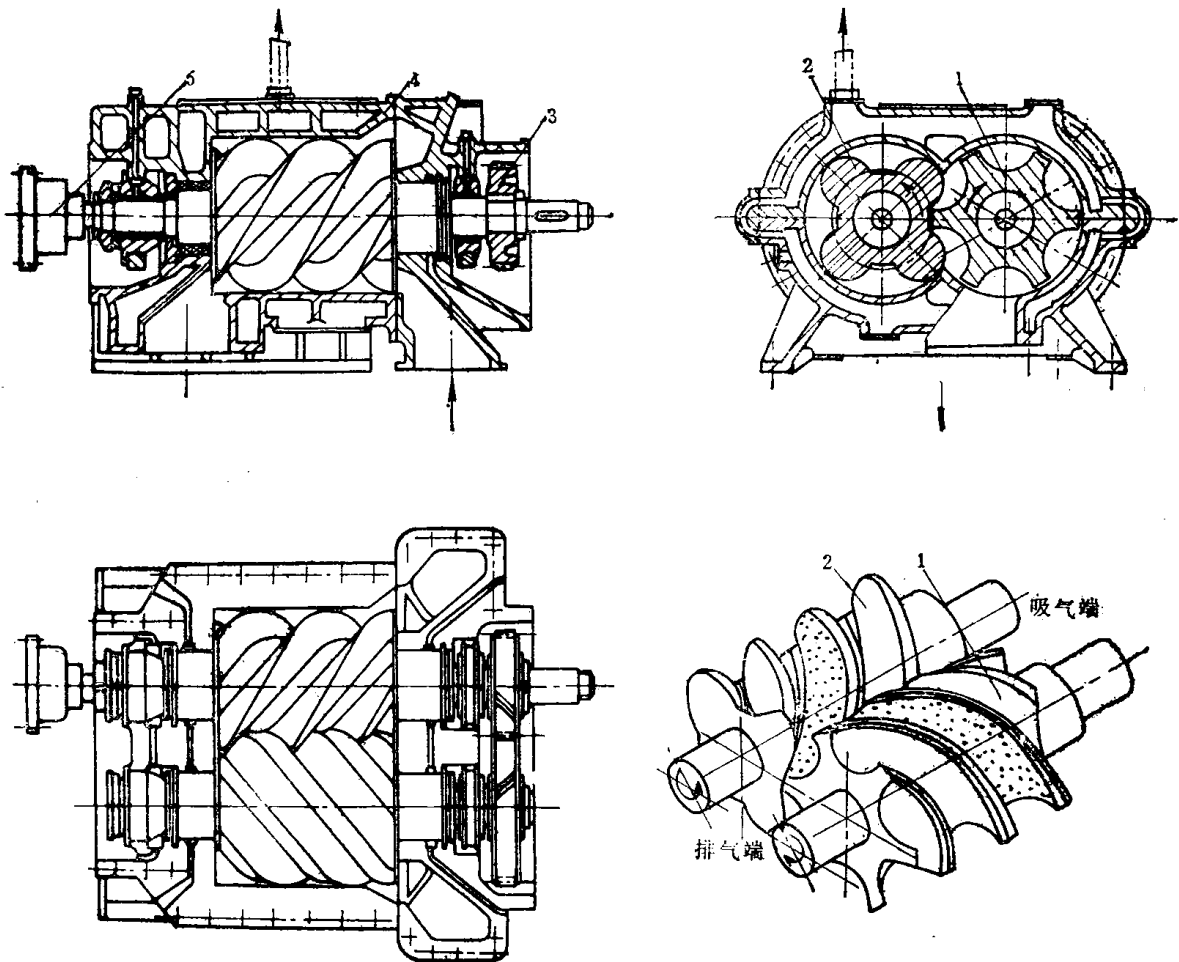


图1-15 螺杆式压缩机

1—阴螺杆 2—阳螺杆 3—啮合齿轮 4—机壳 5—联轴节

近年来还出现了一种单螺杆压缩机，如图 1-16 所示。在转子的两侧有两个星轮与其啮合，转子旋转时，两星轮被带动旋转，从而实现气体吸入、压缩和排气过程。

(二) 动力式压缩机

主要的动力式压缩机叫透平式压缩机，它是一种叶片旋转式机械，在透平式压缩机中，气体压力的提高是利用叶轮的作用，使气体获得速度能，然后通过扩压元件转变为压力能。按透平式压缩机结构形式的不同，主要分离心式压缩机和轴流式压缩机两种。

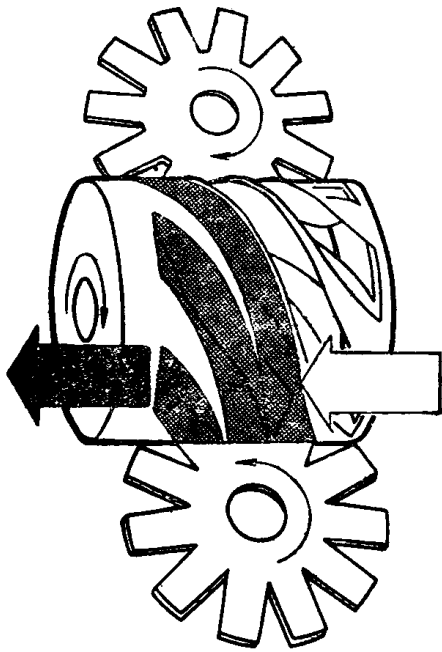


图 1-16 单螺杆压缩机工作原理图

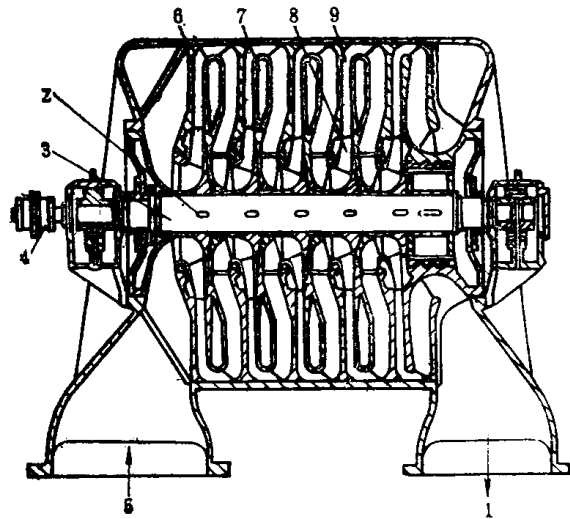


图 1-17 离心式压缩机

1—排出口 2—定位键 3—轴 4—联轴节 5—吸入口 6—机壳 7—隔板 8—叶轮 9—扩压器

1. 离心式压缩机 如图 1-17 所示，它是由一高速旋转的叶轮和在叶轮周围由机壳构成的环形流道（即扩压器和蜗壳）所组成。气体进入叶轮后，在叶片的推动下随叶轮一起旋转而获得高速，并在离心力的作用下沿着半径方向向外流动，然后进入截面逐渐扩大的扩压器和蜗壳后，气体速度逐渐下降，而压力则随之提高，之后又进入第二级，压力再进一步提高，如此类推，一直达到额定压力。

因为气体在压缩机中的运动，是沿着垂直压缩机轴的径向进行的，故被称为离心式压缩机。

2. 轴流式压缩机 如图 1-18 所示，主要是由动叶栅和静叶栅组成，每一排动叶栅和其后的静叶栅构成一级。由于转子旋转，在动叶栅作用下，使吸入的气体产生很高的速度，而在静叶栅中使气体的流动速度又逐渐减缓而变成气体的压力能。

因为气体在压缩机中的运动，是沿着平行于压缩机轴的轴向进行的，故被称为轴流式压缩机。

二、各类压缩机的比较

各类压缩机都有其优缺点，活塞式压缩机的特点是：

1. 适用的压力范围广，不论流量大小都能达到所需压力，目前在工业上已能达到 $3500 \times 10^5 \text{Pa}$ ，实验室中已能达到 $10000 \times 10^5 \text{Pa}$ ；
2. 热效率高（见图 1-19）；

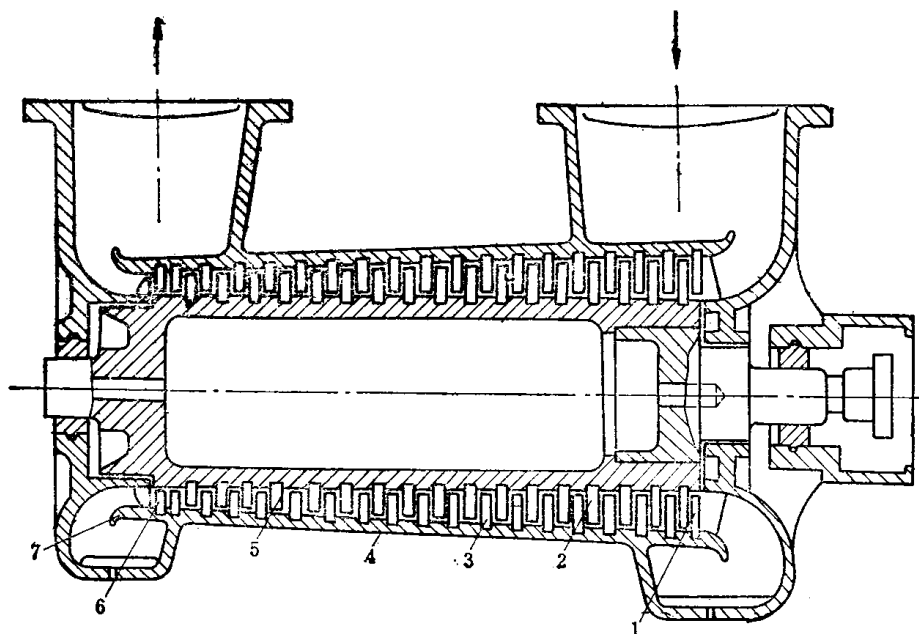


图1-18 轴流式压缩机

1—进口导流叶栅 2—动叶栅 3—静叶栅 4—机壳 5—转鼓 6—整流叶栅 7—出口扩压器

3. 适应性较强，即排气量范围较广，且不受压力高低的影响。例如，单机的排气量最大可达 $500\text{m}^3/\text{min}$ ，最小可很小很小。且在气量调节时，排气压力几乎不变；

4. 转速不高，机器体积大而重；

5. 结构复杂，易损件多，维修量大（但对维修工的技术要求相应较低）；

6. 排气不连续，造成气流脉动。

在容积式压缩机的范围内，回转式和活塞式相比，有它自己的特点，如结构简单，维修方便，排气平稳而无脉动，但其密封较困难，效率较低，噪声较大，排气量范围在 $(0.5\sim 500)\text{m}^3/\text{min}$ 之内，目前两级螺杆压缩机的最高排气压力可达 $45 \times 10^5\text{Pa}$ 。

透平式压缩机的特点是：

1. 转速高，机器的体积小，重量轻；
2. 排气平稳，没有气流脉动；
3. 结构简单，维修方便；
4. 排气量和排气压力的适应性差，最小流量和最高压力不能同时满足；

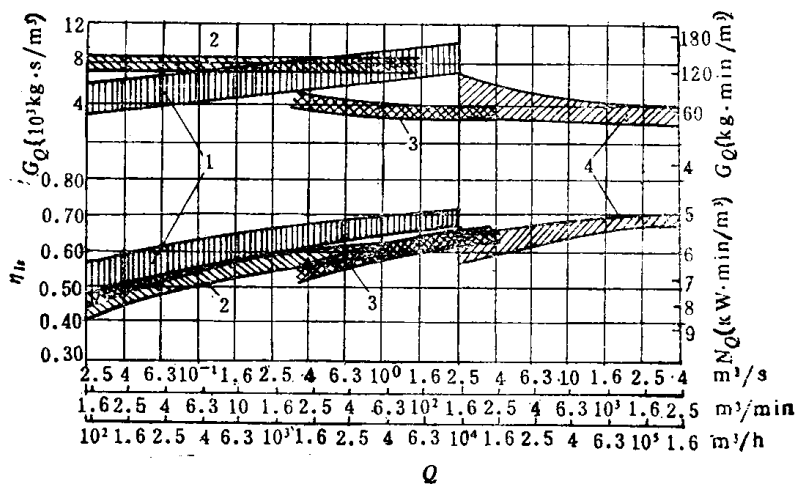


图1-19 各类压缩机经济性指标（排气压力为 $8 \times 10^5\text{Pa}$ ）

1—两级活塞式 2—两级滑片式 3—两级螺杆式 4—具有中间冷却的离心式

5. 热效率较低,但用汽轮机直接驱动时,经济性也较高;

6. 运转状况欠稳定,工作性能随工作条件变化较大;

7. 气体性质的影响较大,难以实现变型与变工况运转。

比较各类压缩机特点,可知活塞式压缩机压力范围之广是其他压缩机所不能与之相比的,这是它的最独特的长处。因此活塞式压缩机适用于高压、中小流量的场合(见图1-20),以及较小排气量的各种压力范围。

透平式压缩机一般说来适用于低压、大流量的情况下(见图1-20)。

回转式压缩机则在低压、中小流量范围内应用。尤其是滑片式和螺杆式,作为空气动力压缩机和冷冻空调装置中的压缩机使用,占有非常重要的地位。

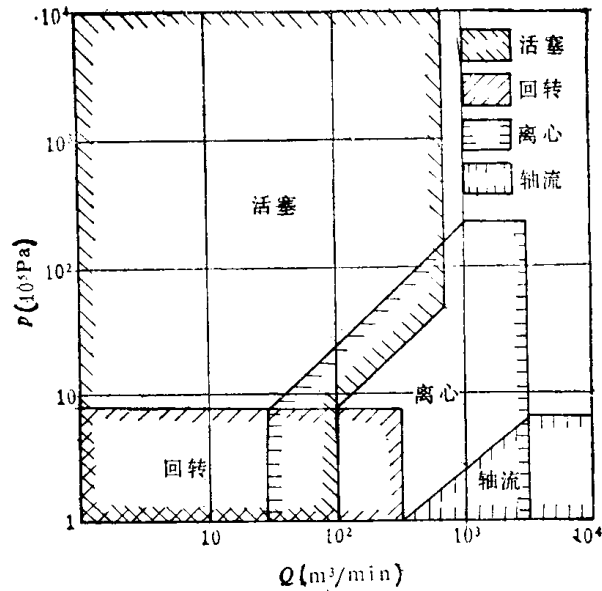


图1-20 目前各类压缩机的应用范围

第三节 活塞式压缩机的分类

本书是以具有曲柄连杆机构的活塞式压缩机为分析对象的,所以将活塞式压缩机习惯分类法介绍如下:

一、按所能达到的排气压力分

名称	排气压力范围
鼓风机	$< 3 \times 10^5 \text{ Pa}$
低压压缩机	$(3 \sim 10) \times 10^5 \text{ Pa}$
中压压缩机	$(10 \sim 100) \times 10^5 \text{ Pa}$
高压压缩机	$(100 \sim 1000) \times 10^5 \text{ Pa}$
超高压压缩机	$> 1000 \times 10^5 \text{ Pa}$

二、按排气量范围分

名称	排气量范围 (按进气状态计)
微型压缩机	$< 1 \text{ m}^3/\text{min}$
小型压缩机	$1 \sim 10 \text{ m}^3/\text{min}$
中型压缩机	$10 \sim 60 \text{ m}^3/\text{min}$
大型压缩机	$> 60 \text{ m}^3/\text{min}$

三、按气缸排列方式分, 见图1-21

名称	气缸中心线位置
立式压缩机	气缸中心线垂直于地面 (图1-21 a)
卧式压缩机	气缸中心线平行于地面, 当气缸