

容积式压缩机 原理与结构设计

西安交通大学 陈永江 编著

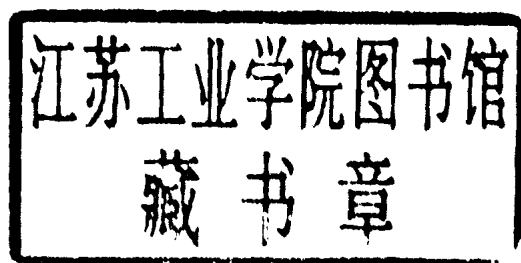
西安交通大学

容积式压缩机

原理与结构设计

西安交通大学压缩机教研室

陈永江 编 著



西安交通大学

容积式压缩机原理与结构设计

西安交通大学动力工程系

压缩机教研室

编 著 陈 永 江

审 稿 石 华 鑫

印 刷 化工部第六设计院

印 刷 厂

印 数: 4000册 定 价: 4.50元

字 数: 537千字 出版日期: 1985.7

前 言

本书共十四章，前九章重点介绍活塞式压缩机的热力学、动力学、结构方案分析及压缩机主要零件受力分析及结构设计和强度验算等基本原理；较详细分析了重要零件受力特征并据此指出设计结构时的关键部位要点；在易发生事故零件部位的改进途径上做了一定陈述；向读者介绍了一些国内外较为先进的产品，并从受力分析对比上指出其优越性之所在。

本书在动力学、方案、气缸、活塞组件、十字头等章节中提出了一些新的内容供读者参考商榷。

第十二章到第十四章分别介绍了主要回转式压缩机的一般工作原理、结构等基本知识。

本书可供高等院校风机、制冷机、化工机械等专业做为教材使用，也可供压缩机专业学员以及从事压缩机设计、研究、制造及运行部门的技术人员做为参考资料之用。

全书采用国际物理单位或规定的与其并用的单位。为了顾及许多尚未熟悉国际物理单位而惯用并熟悉国际工程单位的工程技术人员，书中暂时并列了一些应用工程单位的公式（用括号给出），因此，本书也起到从过去习用工程制单位向新规定的物理制单位逐渐过渡的作用。

全书由西安交通大学动力机械工程系压缩机教研室陈永江编著。

本书由西安交通大学压缩机教研室石华鑫教授审稿，他对本书提出了很多的宝贵意见，特此向他表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免有许多错误，尤其是作者在书中提出一些新内容及观点是否妥当，均望读者批评指正，以便于今后修改。

西安交通大学 陈永江

1985年5月

目 录

| | |
|--------------------------|----------------|
| 绪 论 | (1) |
| 一 压缩机的用途 | (1) |
| 二 压缩机的种类及应用范围 | (2) |
| 三 活塞式压缩机的种类 | (11) |
| 四 压缩机的前景及研究方向 | (13) |
| 第一章 压缩机热力原理 | (15) |
| 第一节 气体热力学基础 | (15) |
| 第二节 压缩机级的理论循环 | (17) |
| 第三节 压缩机级的实际循环 | (23) |
| 第四节 多级压缩 | (36) |
| 第五节 压缩机排气量及气缸尺寸的确定 | (40) |
| 第六节 压缩机的功率和效率 | (47) |
| 第二章 压缩机动力学 | (51) |
| 第一节 曲柄连杆机构的运动学 | (51) |
| 第二节 压缩机中的作用力 | (57) |
| 第三节 压缩机惯性力的平衡 | (61) |
| 第四节 动力曲线的计算及绘制 | (78) |
| 第五节 压缩机扭矩平衡——飞轮矩的确定 | (88) |
| 第三章 压缩机型式、结构方案与驱动 | (92) |
| 第一节 压缩机的型式分析 | (93) |
| 第二节 压缩机结构方案的选择及评述 | (98) |
| 第三节 驱动机的选择 | (122) |
| 第四章 热力、动力应用举例 | (125) |
| 第一节 氮氢气压缩机的热力计算 | (125) |
| 第二节 2V-6/7型空压机动力计算 | (133) |
| 第三节 转速受曲柄销磨损限制的计算 | (140) |
| 第四节 主轴承负荷图计算 | (144) |
| 第五章 气缸 | (152) |
| 第一节 气缸分析及评述 | (152) |

| | | |
|-------------|------------------------|----------------|
| 第二节 | 气缸设计中的其他问题 | (136) |
| 第三节 | 气缸材料 | (166) |
| 第四节 | 气缸壁厚及强度验算 | (167) |
| 第五节 | 高压气缸阀腔部位结构及强度 | (168) |
| 第六章 | 气阀 | (174) |
| 第一节 | 气阀结构 | (174) |
| 第二节 | 气阀运动分析 | (183) |
| 第三节 | 气阀弹簧设计 | (189) |
| 第四节 | 影响气阀正常运动因素分析 | (195) |
| 第七章 | 活塞组件 | (200) |
| 第一节 | 承受侧向力的筒形活塞 | (200) |
| 第二节 | 不承受侧向力的活塞 | (208) |
| 第三节 | 活塞杆结构分析及强度验算 | (211) |
| 第八章 | 压缩机的密封 | (219) |
| 第一节 | 密封分类简介 | (219) |
| 第二节 | 活塞环密封 | (221) |
| 第三节 | 填函密封作用及结构 | (226) |
| 第四节 | 干运转时的密封问题 | (231) |
| 第九章 | 曲柄连杆机构及机身 | (237) |
| 第一节 | 十字头结构及与活塞杆连接方式分析 | (237) |
| 第二节 | 连杆组件 | (246) |
| 第三节 | 曲 轴 | (253) |
| 第四节 | 机 身 | (264) |
| 第十章 | 压缩机的辅助设备 | (269) |
| 第一节 | 压缩机的冷却 | (269) |
| 第二节 | 压缩机的润滑 | (273) |
| 第三节 | 压缩机排气量调节 | (277) |
| 第四节 | 压缩机的监护 | (278) |
| 第十一章 | 压缩机气体管路 | (280) |
| 第一节 | 管路设计 | (280) |
| 第二节 | 管道的振动 | (280) |
| 第三节 | 管道附件 | (286) |
| 第四节 | 管路内的噪声及消声设备 | (288) |

| | |
|--------------------------|---------|
| 第十二章 滑片式压缩机 | (291) |
| 第一节 工作原理及结构特点 | (291) |
| 第二节 排气量的计算 | (292) |
| 第三节 吸、排气孔口位置的确定 | (295) |
| 第四节 斜置滑片和卸荷环 | (298) |
| 第五节 功率及效率 | (300) |
| 第十三章 罗茨鼓风机 | (302) |
| 第一节 工作原理和结构特点 | (302) |
| 第二节 理论排气量及容积效率 | (304) |
| 第三节 罗茨鼓风机的功率及效率 | (309) |
| 第十四章 螺杆式压缩机 | (312) |
| 第一节 概 述 | (312) |
| 第二节 转子的型线 | (317) |
| 第三节 排气量计算 | (323) |
| 第四节 内压缩 | (324) |
| 第五节 功、功率及效率 | (328) |
| 第六节 回转式压缩机的喷液问题 | (332) |
| 附 录 | (337) |
| 附表及附图 | (337) |
| 书中符号及单位 | (348) |
| 参考资料 | (350) |

绪 论

一 压缩机的用途

压缩机是一种压缩气体提高气体压力或输送气体的机器，在社会主义建设的许多部门中应用极广。在采矿业、冶金业、机械制造业、土木工程、石油化学工业、制冷与气体分离工程以及国防工业中，压缩机是必不可少的关键设备之一。此外，医疗、纺织、食品、农业、交通等部门对压缩机的需求也与日俱增。

压缩机因其用途广泛而被称为“通用机械”。

压机气体的使用有各种不同的目的，但可以分为下列几种：

1) 压缩气体作为动力 压缩空气供驱动各种风动机械、风动工具，压缩机的排气压力为 7~15 bar；用于控制仪表及自动化装置，压力约为 6 bar；车辆制动、门窗启闭，压力为 2~4 bar；制药业、酿造业中的搅拌，压力为 2~6 bar；喷气织机中纬纱吹送压力为 1~2 bar；中、大型柴油机的启动，压力为 25~60 bar；油井的压裂，压力约为 150 bar；“二次法采油”，压力约为 50 bar；高压爆破采煤压力为 800 bar；国防工业中某些武器的发射，潜水艇的沉浮以及沉船打捞等等，都以不同压力的压缩气体为其动力。

2) 压缩气体用于制冷和气体分离 气体经压缩、冷却、膨胀而液化，用于人工制冷（冷冻、冷藏及空气调节等），如氨或氟里昂压缩机，其压缩压力多为 8~12 bar，这一类压缩机通常称为“制冷机”或“冰机”。另外，液化的气体若为混合气时，可在分离装置中按其不同的气化温度将各组份分别地分离出来，得到合格纯度的各种气体。如空气液化分离后，能得到纯氧、纯氮和纯的氩、氦、氪、氙、氡等稀有气体。用于空气分离装置的压缩压力，低压流程为 5~6 bar；中压流程为 15~25 bar；高压流程为 150~220 bar。

近年来，石油化学工业发展很迅速，其原料气——石油裂解气的分离，是先经压缩，然后采用不同的冷却温度，将各组份分别地分离出来的。所用压缩机压力多为 18~24 bar。

3) 压缩气体用于合成及聚合 在化学工业中，气体压缩至高压，常有利于合成及聚合。例如氮与氢合成氨、氢与二氧化碳合成甲醇、二氧化碳与氨合成尿素等。前两种合成时可有三种压力：低压合成的压力为 150~220 bar；中压合成时 300~450 bar；高压合成时 800~1000 bar。尿素合成时，二氧化碳的压力为 210 bar。又如，化学工业中，聚乙烯工业近年来发展很快，所用聚合压力范围很广，例如高压聚乙烯的压力达 1500~3200 bar。

4) 压缩气体用于油的加氢精制 石油工业中，用人工方法把氢加热加压后与油反应，能使碳氢化合物的重组份裂化成碳氢化合物的轻组份。如重油的轻化、润滑油加氢精制等。氢气压缩机的压力有 70~90 bar；150 bar；320 bar 三种。

5) 气体输送 用于管道输送气体的压缩机，视管道长短而决定其压力。远程煤气时，压力可达 30 bar。用于气体装瓶的压缩机，则视气体的性质而定：一般氧气瓶压力为 150 bar；乙炔气的性质极不稳定，装瓶压力为 25 bar，且由丙酮加以吸附；有些临界温度较高的容易

液化的气体，可先压缩，加以冷却使其液化而装瓶。如氯气装瓶压力为10~15 bar，二氧化碳装瓶压力为50~60 bar。现代城市广泛使用的液化气石油装瓶压力约为5~15 bar。

二 压缩机的种类及应用范围

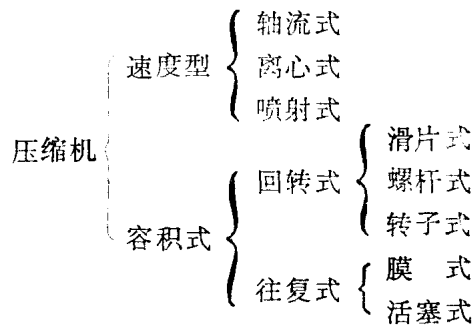
(一) 压缩机的种类

现代工业中，压缩气体的机器用得愈来愈多，出现了各种型式的压缩机，如按工作原理区分，则可划分为两大类，即速度型和容积型。

速度型压缩机靠气体在高速旋转叶轮的作用下，得到巨大的动能，随后在扩压器中急剧降速，使气体的动能转变为势能（压力能）。

容积型压缩机靠在气缸内作往复或回转运动的活塞，使容积缩小而提高气体压力。

倘再在两大类中考虑压缩机结构型式不同，则可用下列格式表示为



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体积被缩小，使单位体积内气体分子的密度增加而形成。容积式压缩机有两种主要结构型式，即往复活塞式和回转活塞式，简称“活塞式压缩机”和“回转式压缩机”。

活塞式压缩机中实现活塞的往复活动，主要是应用曲柄连杆机构（如图1所示），把原动机的旋转运动变成活塞的往复运动，这种结构形式在目前应用最广。但是，事物是在不断地发展和前进着。现在出现一种“斜盘机构”活塞式压缩机（如图2所示），原动机的旋转运动，通过一个转动的斜盘转化为活塞的往复运动。这种结构在大型压缩机中使用时，尚须克服许多困难，但在小型中使用时，则因结构紧凑、重量轻、而有其一定的长处。此外，在自由活塞式压缩机中，压缩机的活塞和内燃机的活塞直接相连（见图3）。内燃机工作时，其活塞直接推动压缩机的活塞，因此不需要曲柄连杆或斜盘之类来传递动力。这种压缩机较紧凑，但运转不易稳定，制造水平和运转管理水平都要求较高故，目前使用尚不普遍。

图4所示为膜式压缩机结构图，它虽是活塞式压缩机的主体结构，但活塞与气缸内充满着油液，由油液去促使真正气缸内的金属膜（均在图上方的大直径“缸盖”中）上下变形而造成膜片上方的容积变化，并借以达到气体的吸入、压缩及排出。由于传统的活塞式压缩机只充作驱动油液的机器，而由金属膜片变形完成工作循环，使被压缩的气体并不与油液接触，故多用于压缩不得为油所污染的贵重气体。

容积式压缩机第二大类是回转式压缩机，它们都是有一至两个或更多的转子作旋转运动，借助转子间以及转子与固定的气缸间的容积变化而达到压缩或输送气体的目的。

典型的回转式压缩机有罗茨鼓风机、螺焊式压缩机、滑片式压缩机等。

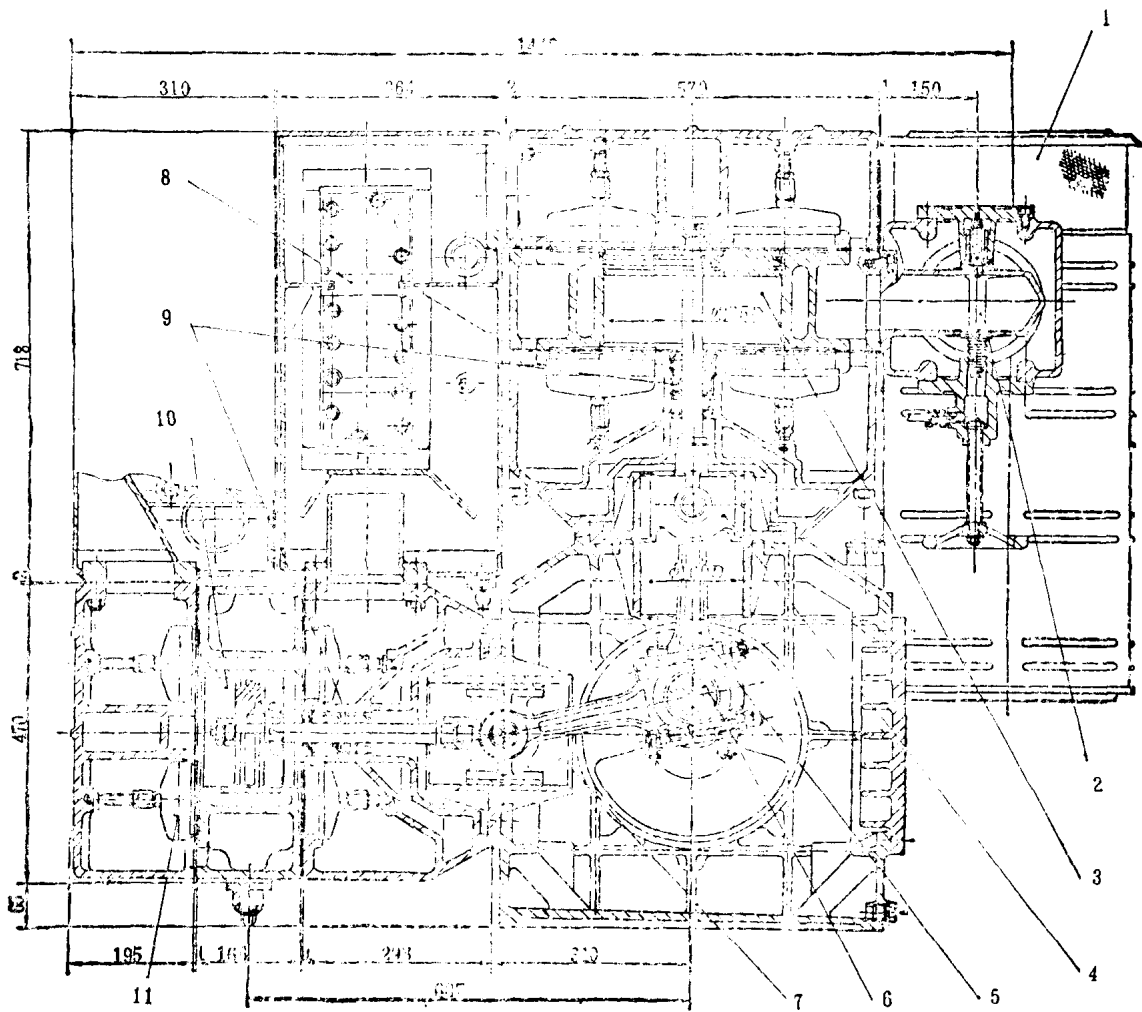


图1 具有曲柄连杆机构的活塞式压缩机

- 1—进气滤清器；2—进气截止阀；3—低压级气缸；4—十字头；5—连杆；
6—曲柄销；7—插入式导轨；8—中间冷却器；9—填料；10—高压级气缸；11—气阀

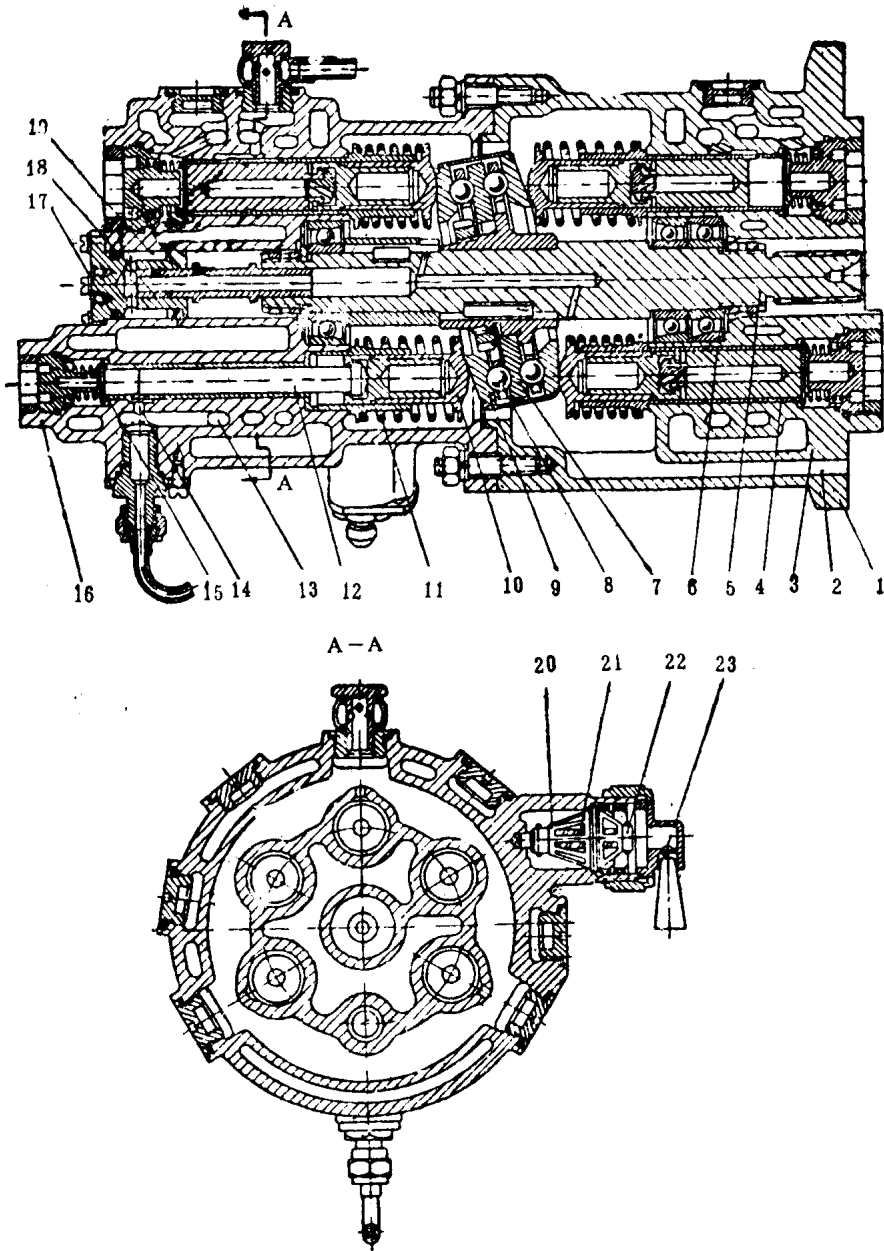


图2 具有斜盘机构的十缸四级活塞式压缩机

- 1—连接法兰；2—溢油槽；3和16—前后机身；4—气缸套；5—转动轴；6—径向止推轴承；
 7—斜盘；8—球面止推轴承；9—滚动轴承座圈；10—十字头；11—十字头弹簧；12—柱塞；
 13—气体通道；14—配气孔；15—菌形阀；17—油腔密封；18—游动套筒；19—油腔；20—温度调节器节气阀；
 21—温度调节器的双金属弹簧；22—固定支座；23—冷却水入口

($n=33.3 \text{ l/s}$)

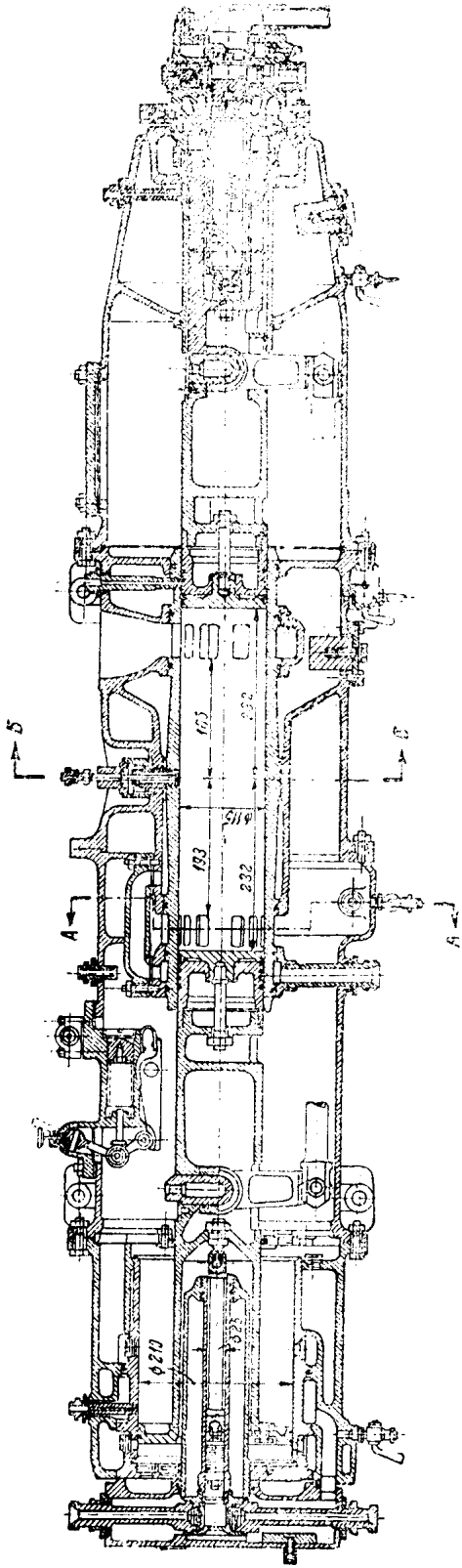


图3 自由活塞式压缩机

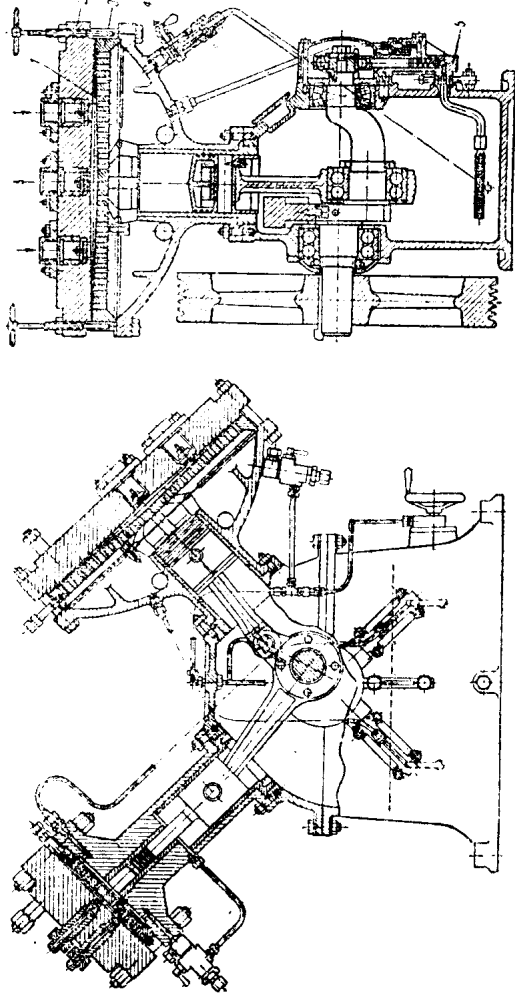


图4 膜式压缩机
 1—膜片； 2—缸的气板； 3—缸的油板； 4—单通阀； 5—供油泵

罗茨鼓风机如图 5 所示，它是一个两转子式机，其工作原理是“8”字形叶片相对旋转，由低压端将气体吸入气缸内，不经内部压缩地送至高压排气端，这是回转式的原始产品，有三转子四转子式共三种，且为了输气均匀，叶片有制成扭曲形的，多用于高炉鼓风以及内燃机废气增压上。

图 6 所示是滑片式压缩机，滑片式压缩机的气缸是圆筒形的，上面开有进排气孔口，缸内有一偏心安置的转子，转子上开有若干径向滑槽，内置滑片。当转子旋转时，滑片在离心力的作用下紧压在气缸的内壁上，并将气体自进气口输至排气口。

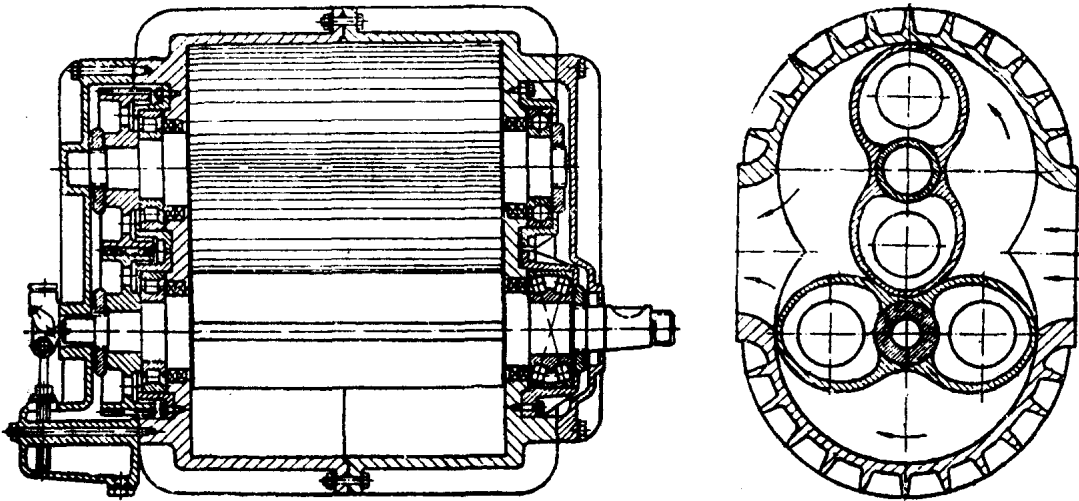


图 5 两叶直叶片式罗茨鼓风机

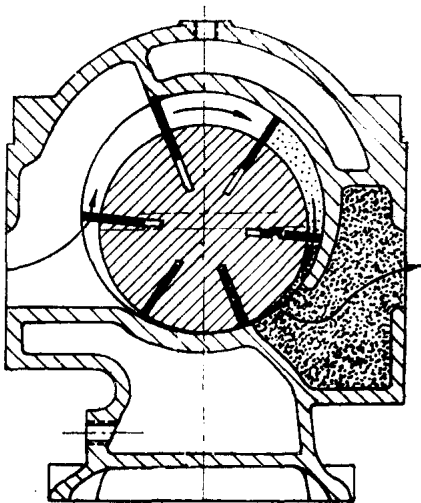


图 6 滑片式压缩机

螺杆式压缩机的气缸成“8”字形，内置两个转子——阳螺杆和阴螺杆，阳阴螺杆的齿形分别呈凸形与凹形，齿数多用 4:6，工作时二者相对而转动，阴转子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而经压缩并由另一端压出，如图 7 所示。

近年还出现了一种单螺杆压缩机，如图 8 所示。在单螺杆两侧有两个叶轮与其啮合，转子旋转时，两叶轮被带动旋转，从而实现气体的吸入、压缩及排出。

图 9 是转子式压缩机 它是在圆筒形气缸内设置一个偏心圆柱形转子，气缸上方设有“一个”滑片把进、排气口隔开。转子旋转时有如滑片式一样，在气缸、转子、滑片三者之间的容积不断变化而实现气体的吸入、压缩及排出。与滑片式不同之处除滑片位置不同外，后者每转中只能完成一次工作循环。

图 10 是水环式压缩机，它也是利用偏心转子上固定的若干翅片在气缸内旋转时，将缸内液体由离心力甩至缸壁并在缸壁内形成等径向液体层，故与偏心转子间形成月牙形空间，

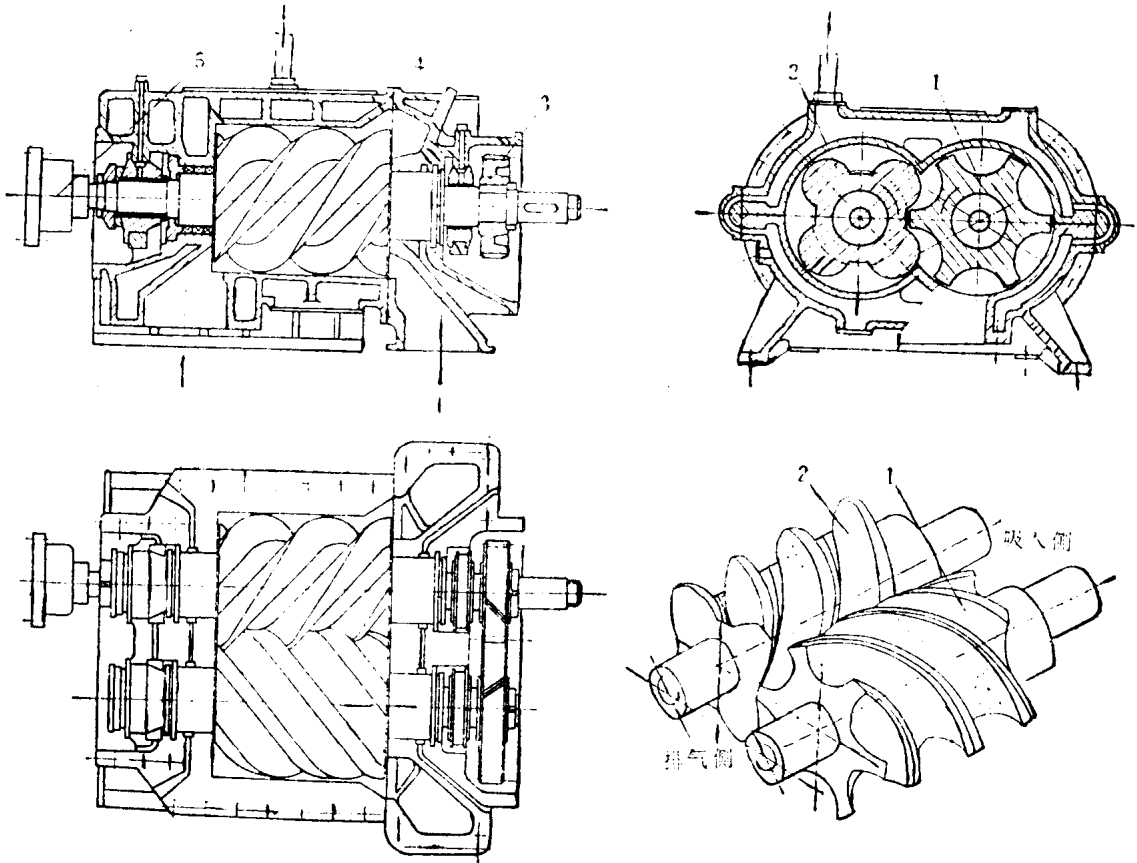


图7 螺杆式压缩机

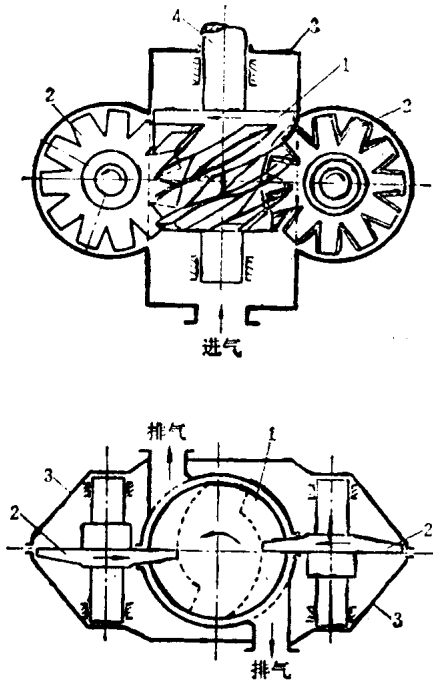


图8 单螺杆式压缩机

1—螺杆；2—叶轮；3—壳体；4—主轴

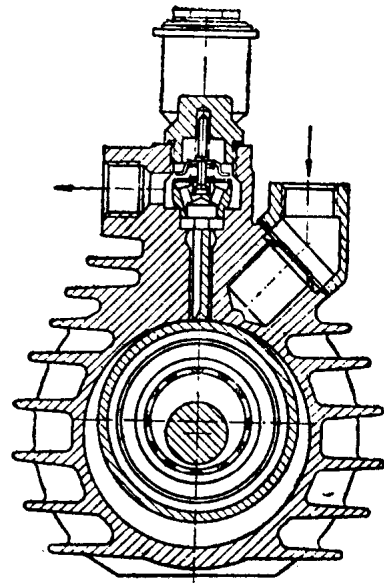


图9 转子式压缩机

于是片间的容积便由小到大再由大到小完成吸气、压缩和压出过程。

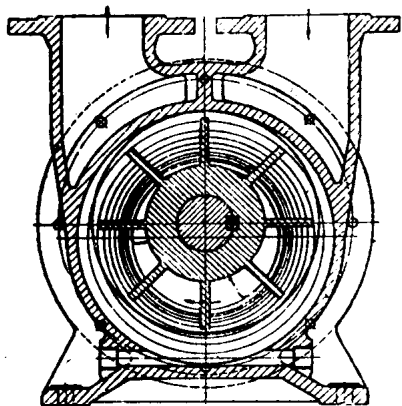


图10 水环式压缩机

速度式压缩机 速度式压缩机中，气体的压力是由气体分子的速度转化而来。即先使气体分子得到一个很高的速度，然后又让它停滞下来，使动能转化为位能，即使速度转化为压力。速度式压缩机也有两种结构形式：离心式压缩机和轴流式压缩机。

离心式压缩机（图11）的主轴带动叶轮旋转时，气体自轴向进入，并以很高的速度被离心力甩出叶轮，进入具有扩压作用的固定的导叶中，在这里将速度降低而压力提高。接着又被第二级吸入，通过第二级进一步提高压力。如此类推，一直达到额定压力。

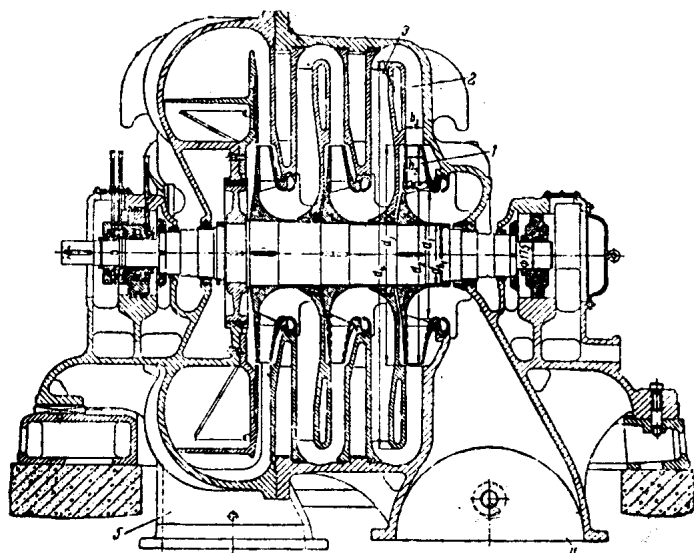


图11 离心式压缩机

轴流式压缩机（如图12）的叶轮旋转时，气体被轴向吸入，经过叶轮获得速度，再轴向地排入固定的导叶进行扩压而提高气体压力。然后进入第二级、第三级……。

除离心式和轴流式两种之外，还有一种喷射泵（图13），也可认为是速度式压缩机的一种。不过喷射泵不具备运动机构，只有喷射器及扩压管两大固定件，它是靠高压气流经喷嘴喷射时造成高速度低压力区，把被引射的低压气体吸入此区，并随同前者一起进入扩压器而降速升压，混合后的气体压力低于原高压气流压力却高于被引射的气体压力，从而达到把被引射气体压力提高的目的。多用于化肥厂循环气中而代替循环机。

喷射泵只有调节针杆的针头部分易为气流冲击损坏，但总体看来结构简单得多。

（二）两大类压缩机的特点

容积式与速度式相比，有如下特点

优点

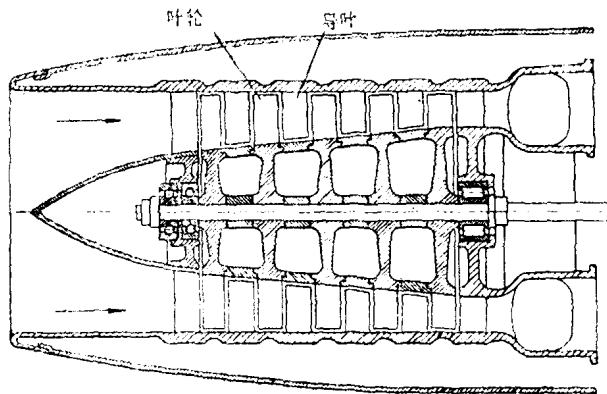


图12 轴流式压缩机

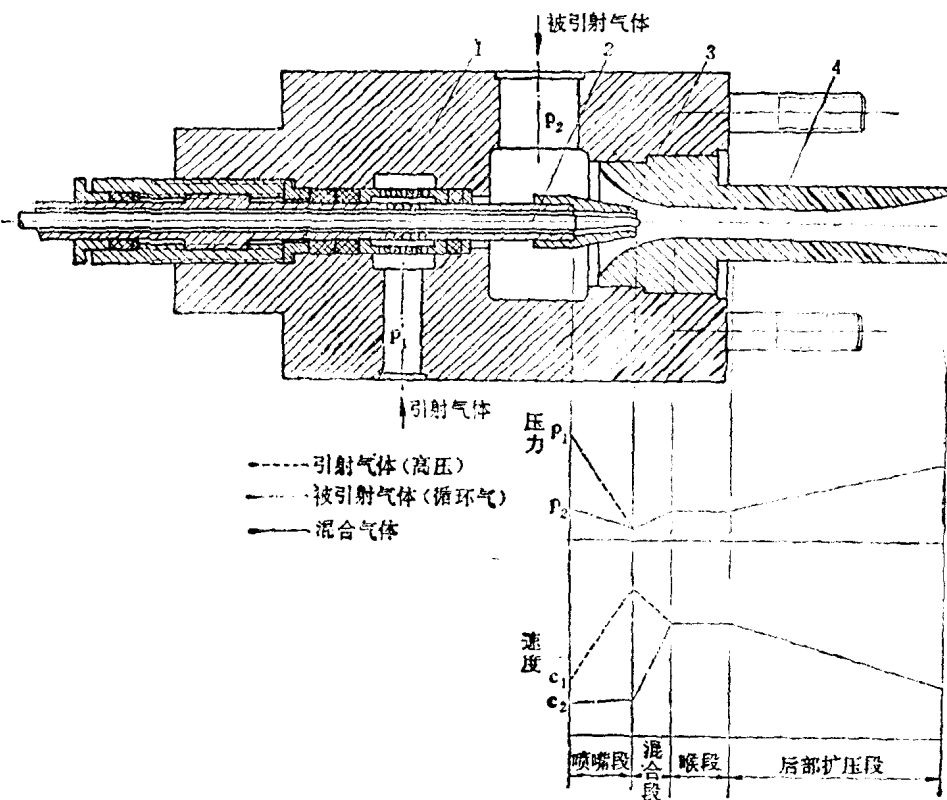


图13 喷射式压缩机

- 1) 背压稳定, 压力范围广泛, 且在各种流量时最高压力都能达 3200 bar (工业) 甚至 7000 bar (实验室);
 - 2) 单机能适应 ($8.34 \text{ m}^3/\text{s}$ 即 $500 \text{ m}^3/\text{min}$ 左右的) 任意流量;
 - 3) 热效率较高;
 - 4) 在一般压力范围内, 对材料的要求低, 多用普通的钢铁材料。
- 缺点

1) 转数不高, 单机排气量大于 $8.34\text{m}^3/\text{s}$ ($500\text{m}^3/\text{min}$) 时, 机器显得大而重, 电机尺寸也相应较大;

2) 结构复杂, 易损件多, 维修量大;

3) 运转时有振动;

4) 输气不连续, 气体压力有脉动。

在这些相对的优缺点中, 第一个优点是它独特的长处。速度式压缩机在这一点上无法与它相比。一般说来, 活塞式压缩机最宜用于高压力, 中、小流量的场合。

速度式压缩机虽然运转欠稳定, 热效率较低, 但由于结构简单紧凑, 振动小, 易损件少维修量小而很受用户欢迎。近年来, 通过种种努力, 其最高压力已能达 400bar ; 单机最小流量已降到 $10\text{m}^3/\text{min}$, 但最高压力和最小流量则不能同时达到。若用汽轮机直接驱动时, 其经济性也较高。一般说来, 速度式压缩机宜用于低、中压力, 大流量的情况下。其单机最大流量已达 $7000\text{m}^3/\text{min}$ 。

回转式压缩机的结构也较简单, 维修方便, 但其密封较困难, 效率较低。它的排气量为 $0.5\sim 500\text{m}^3/\text{min}$, 目前最高压力可达 45bar 。在低压、中小流量范围内, 回转式压缩机很有发展前途, 单螺杆、喷油双螺杆压缩机在低压范围发展也很迅速。

(三) 应用范围

图 14 是当前各类压缩机应用范围的统计图, 图中示出它们所能达到的排气量及压力区域。

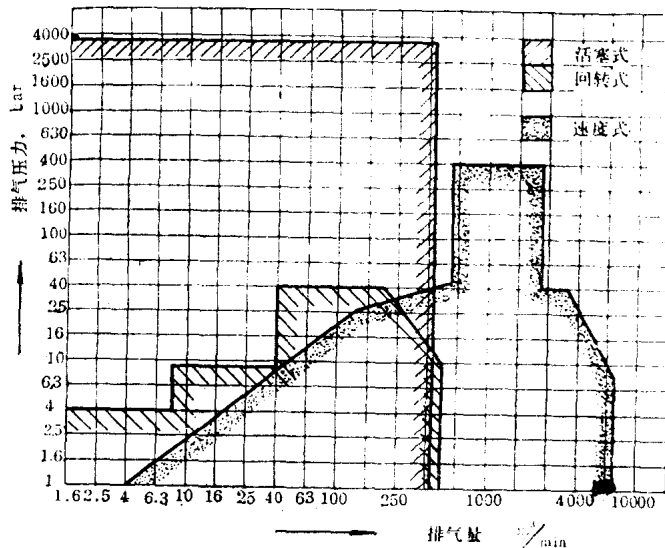


图 14 各类压缩机的应用范围

在我国飞速发展的社会主义建设中, 使用压缩机的场合多种多样, 对排气量和压力的要求各不相同, 不可能用某一种压缩机完全代替另一种压缩机, 而是在不同场合下发扬各自的优点, 在社会主义建设的各部门中充分发挥作用。这正如同燃气轮机至今乃至今后无法取代活塞式内燃机一样。

至于超高压下聚合某些化学材料, 则非活塞式压缩机莫属。

大流量中低压力的场合则又是速度式压缩机的特长之处。