



高等学校试用教材

化工机器

上册

浙江大学 北京化工学院等合编

潘永密 李斯特 主编

化学工业出版社

高等学校试用教材

化 工 机 器

上 册

浙江大学 北京化工学院等合编

潘永密 李斯特 主编

化 学 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书是根据1978年所制订的化工机器教材编写大纲而编写的。全书共五篇三十章,分上、下册出版。上册为活塞式压缩机;下册为离心式机器,其中包括离心机、离心泵、离心式压缩机。书中主要介绍这些常用化工机器的工作原理、主要性能、结构特点以及基本设计计算方法等。为了较系统地阐述,并避免重复,下册中还对离心式机器的高速回转件的强度和临界转速作了专篇介绍。

上册的具体内容,概括如下:

详细介绍了活塞式压缩机的热力学和动力学,其中对曲柄连杆机构的运动和作用力的分析,作了系统而全面的阐述。关于结构方面,除全面介绍了总体结构外,对主要零部件,还作了重点介绍。此外对活塞式压缩机在化工系统各工厂中的应用情况和运转中的主要问题——气量调节和润滑,也作了比较详细的介绍。

本书可作为高等学校化工机械专业的试用教材,也可供从事化工机器设计、科研和生产的工程技术人员参考。

31130/26

高等学校试用教材

化 工 机 器

上 册

浙江大学 北京化工学院等合编

潘永密 李斯特 主编

化学工业出版社 出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学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14¹/₂字数362千字印数1—13,650

1980年6月北京第1版1980年6月北京第1次印刷

书号15063·3059(K-225)定价1.50元

前 言

本书是根据化学工业部于1977年10月在镇江召开的教材工作会议和1978年2月在上海召开的教材编写会议的决定编写的，可作为高等学校化工机械专业的试用教材。

化工机器的种类繁多，本书仅介绍化工厂中使用较为广泛的几种机器——活塞式压缩机、离心式压缩机、离心泵及离心机。编写时，力求做到加强基础理论，理论联系实际，并尽量反映现代科学技术方面的内容。

本书分五篇，各篇的重点如下。

第一篇 活塞式压缩机：热力计算，动力计算及结构分析。

第二篇 高速回转件的强度与转轴的临界转速；高速转盘应力分析的二次计算法和有限单元法及转轴临界转速的计算。

第三篇 离心机：工作原理及结构分析。

第四篇 离心泵：工作原理、工作点的确定及性能曲线的换算。

第五篇 离心式压缩机：基本方程及其应用，相似原理及气量调节。

本教材应在下列前修课的基础上进行教学：工程热力学（或物理化学）；材料力学；机械原理；化工容器及设备。此外，还应学过线性代数，算法语言等。

各校在使用本书时，可根据具体情况适当地删减。此外，按本书进行教学时，应有相应的实验、实习课与之配合。

根据教材中要引入国际单位制的精神，本书附有工程单位制和国际单位制换算表，并在各篇后附有两种单位制的典型公式对照表，以备读者查用。

本书上册由北京化工学院李斯特主编，其中活塞式压缩机的热力学及动力学部分由北京化工学院李斯特和柳松年编写，结构和运转部分由浙江化工学院贾高顺编写；下册由浙江大学潘永密主编，其中第二篇高速回转件的强度与转轴的临界转速部分由浙江大学顾金初和申亚明编写，第三篇离心机部分由华南工学院刘健宏、岑汉钊和欧阳国豪编写，第四篇离心泵和第五篇离心式压缩机由浙江大学潘永密编写（其中第三十章由浙江大学华永利编写）。参加本书的审稿人员有：上海化工学院琚定一（主审）、成都科学技术大学孙启才、南京化工学院王德润、华东石油学院顾永泉、上海化工学院王允昌。

由于编写时间比较仓促，未能广泛地征求兄弟院校及有关单位的意见，又限于编者的政治思想和业务水平，谬误不足之处在所难免，望兄弟院校及有关单位的同志提出批评指正。

编 者

1979年5月

目 录

前 言

第一篇 活塞式压缩机

第一章 概述	1
一、压缩机的应用与分类.....	1
二、活塞式压缩机的特点、基本构造及其附属设备.....	6
三、活塞式压缩机的种类及其型号编制.....	7
第二章 活塞式压缩机热力学基础	11
第一节 理想气体状态方程式和热力过程方程式.....	11
第二节 压缩机的工作循环.....	20
第三节 压缩机的排气量及其影响因素.....	25
第四节 压缩机的功率和效率.....	32
第五节 多级压缩.....	39
第六节 实际气体.....	55
第七节 压缩机的变工况及其计算.....	66
第八节 活塞式压缩机热力计算示例.....	70
第三章 活塞式压缩机动力学	76
第一节 曲柄连杆机构的运动.....	76
第二节 压缩机中的作用力和力矩.....	82
第三节 压缩机的动力平衡.....	88
第四节 综合活塞力图的绘制.....	96
第五节 切向力图的分析与飞轮矩的确定.....	101
第六节 活塞式压缩机动力计算示例.....	112
第四章 活塞式压缩机的总体结构	123
第一节 压缩机主要结构参数的选择.....	123
第二节 压缩机的结构型式.....	125
第三节 列与级的配置.....	135
第四节 石油、化工用压缩机的特点.....	136
第五章 活塞式压缩机主要零部件	143
第一节 气缸.....	143
第二节 活塞组件与填料函.....	155
第三节 气阀.....	177
第四节 传动机构.....	186
第六章 活塞式压缩机的运转	204
第一节 排气量调节.....	204

35525

第二节 润滑.....	208
第三节 气流脉动与管路振动.....	211
附录 I	215
一、常用气体的主要物理性质.....	215
二、常用气体可压缩性系数 ξ 图.....	217
三、常压下某些气体的定压比热 c_p	221
四、活塞式压缩机的活塞力与主要结构参数表.....	222
五、工程单位制与国际单位制 (SI) 的典型公式对照表.....	223
六、工程单位制与国际单位制 (SI) 常用换算表.....	224
参考文献	225

第一篇 活塞式压缩机

第一章 概 述

一、压缩机的应用与分类

随着近代科学技术的不断发展，作为重要能量形式之一的压力能在工业生产上的应用已十分普遍，所占的地位相当重要。压缩机就是产生气体压力能的机器，它在国民经济各部门中特别在化工、石油、矿山、冶金、机械以及国防工业中已成为必不可少的关键设备。其重要的应用场合有：

(1) 化工工艺过程上的应用

在化工生产中，为了保证某些合成工艺能在高压条件下进行，往往通过压缩机把气体预先加压到所需的压力。例如高压聚乙烯的聚合反应要求把乙烯气加压到 2000kgf/cm^2 以上；合成氨的反应要求把合成气加压到 320kgf/cm^2 ；石油裂解加氢要求把氢气加压到 150kgf/cm^2 以上等。

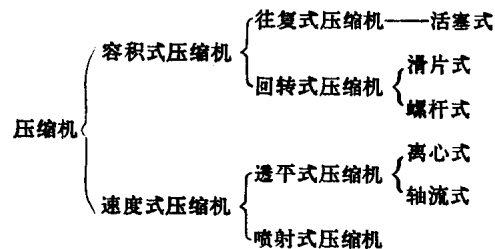
(2) 动力工程上的应用

在动力、机械以及国防工业上常采用压缩空气作为驱动装置的动力气源，例如常见的风动机械，要求空气的压力为 8kgf/cm^2 ；用于控制仪表及自动化装置上的气源压力为 6kgf/cm^2 ；国防工业中某些武器的发射、潜水艇的沉浮、鱼雷的发射驱动等都需采用压缩机。

(3) 气体输送

在石油、化工生产中，为了输送原料气，常用压缩机增压。例如从油田输出天然气，从煤气厂输出煤气都要求事先加以增压。此外，在化工流程中为了使系统内未反应气体得以再循环，常用循环压缩机加以增压。

按照能量转换的方式不同，常用压缩机可分为两大类：



(一) 容积式压缩机

容积式压缩机的工作原理是依靠气缸工作容积周期性的变化来压缩气体，以达到提高其压力的目的。按其运动特点不同，又可分为以下两种。

1. 往复式压缩机 最典型的往复式压缩机是活塞式压缩机。它是依靠气缸内活塞的往复运动来压缩气体。根据所需压力的高低，它可以作成单级或多级；为了使机器受载均衡，它还可作成单列或多列，图1-1所示为一卧式四列五级对称平衡型活塞式压缩机的结构总图。目前工业上凡需高压的场合多采用这类压缩机。

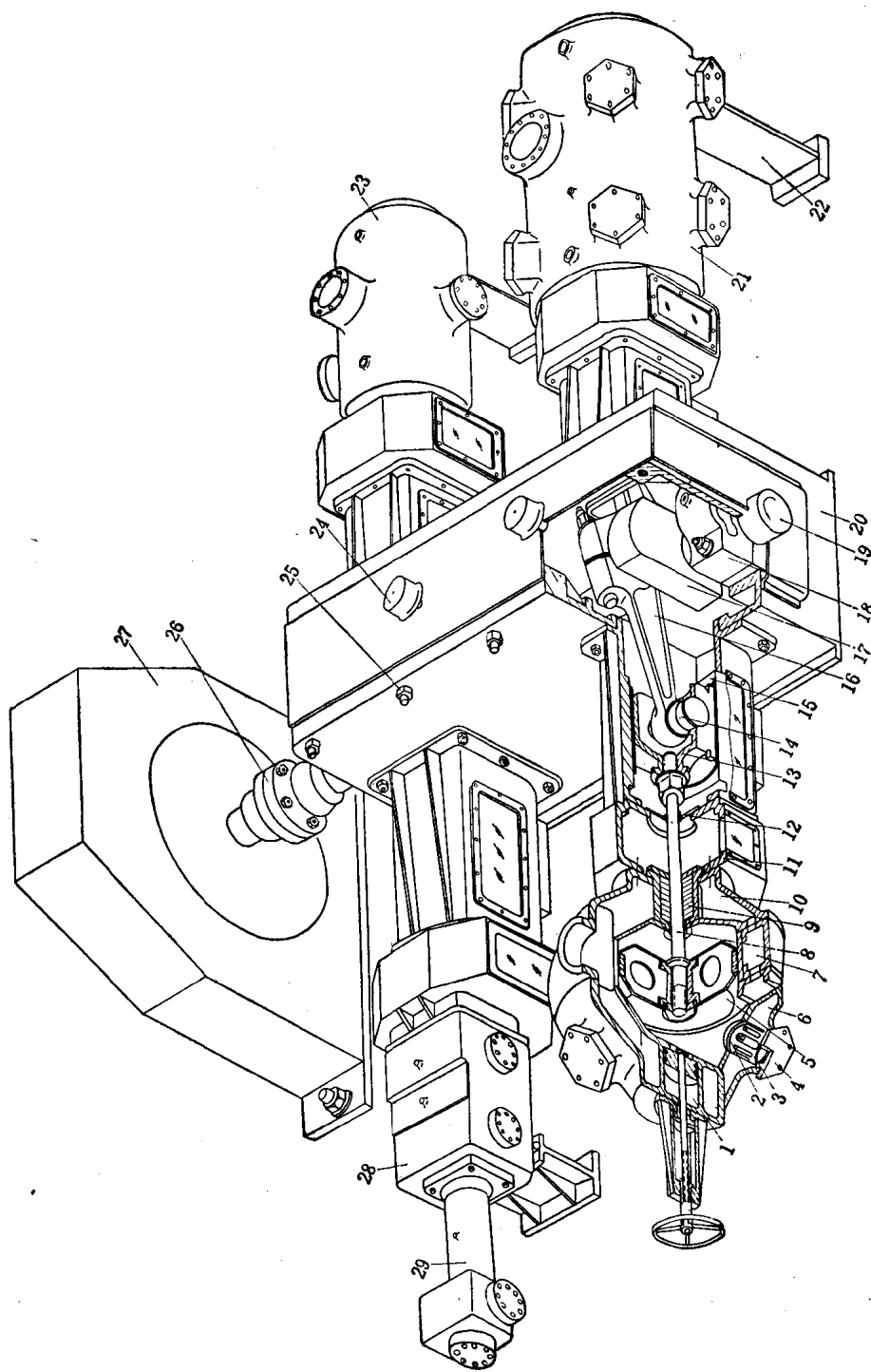


图 1-1 活塞式压缩机结构总图

1—气量调节装置, 2—气阀, 3—气阀压筒, 4—压盖, 5—I级活塞组件, 6—I级缸夹套, 7—I级缸气通, 8—活塞杆, 9—密封填料, 10—I级气缸, 11—中间接筒, 12—刮油环, 13—十字头组件, 14—十字头销, 15—中体, 16—连杆组件, 17—曲柄, 18—主轴承, 19—曲轴, 20—机身, 21—I级气缸, 22—支承座, 23—II级气缸, 24—放气罩, 25—拉紧螺栓, 26—联轴节, 27—驱动电机, 28—V级气缸, 29—V级气缸

2. 回转式压缩机 回转式压缩机内无往复运动件，它是依靠机内转子回转时产生容积变化而实现气体的压缩。按照结构形式的不同，又可分滑片式和螺杆式两种。滑片式如图1-2所示，机内转子偏心装在机壳内，转子上开有若干径向滑槽，槽内装有滑片，当转子转动时，滑片与机壳内壁间所形成的压缩腔容积不断缩小，从而使气体受到压缩。这类压缩机排气压力不高，常用于合成橡胶工业。螺杆式的结构如图1-3所示，机壳内置有两个转子——阴螺杆和阳螺杆，由同步齿轮带动。工作时依靠螺杆表面的凹槽与机壳内壁间所形成的压缩腔容积不断变化，从而实现气体的吸入、压缩及排出。这类压缩机除常作动力用的空气压缩机外，还应用于制冷工业。

(二) 速度式压缩机

速度式压缩机的工作原理与容积式截然不同，它是靠机内作高速旋转的叶轮，使吸进的气流能量头提高，并通过扩压元件把气流的动能头转换成所需的压

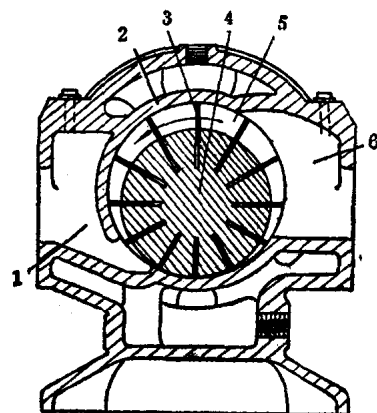


图 1-2 滑片式压缩机

1—排气口；2—机壳；3—滑片；4—转子；5—压缩腔；6—吸气口

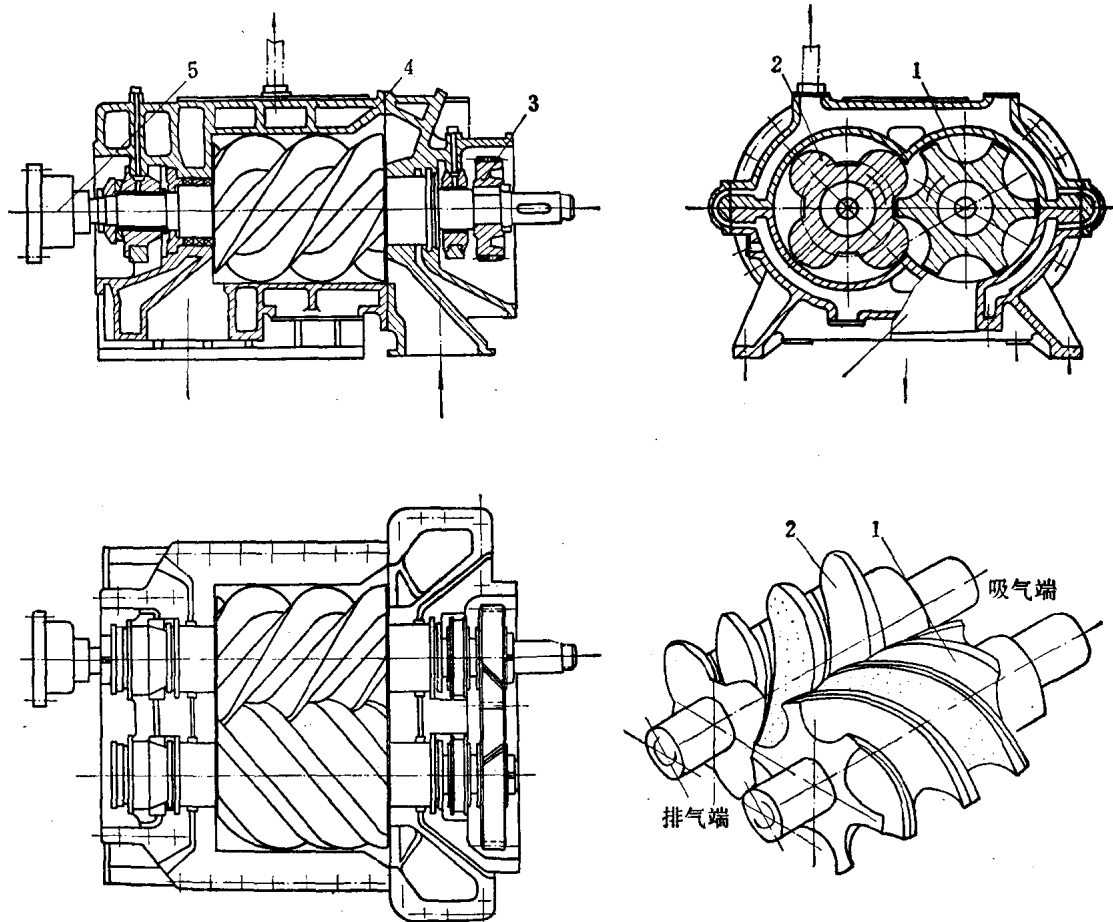


图 1-3 螺杆式压缩机

1—阴螺杆；2—阳螺杆；3—啮合齿轮；4—机壳；5—联轴节

力能量头。根据气流方向的不同,这类压缩机又可分为离心式和轴流式两种。

1. 离心式压缩机 图1-4为一台五级离心式压缩机的结构简图。机壳内主轴上装有五个

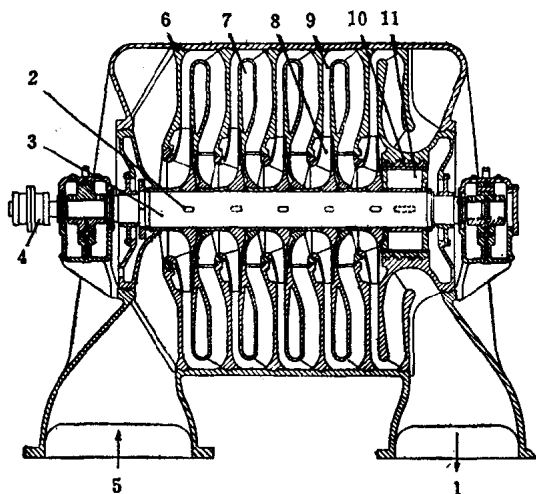


图 1-4 离心式压缩机

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; 10—平衡盘密封; 11—平衡盘

叶轮, 每个叶轮与其相配合的固定元件构成一个级。工作时气体被吸入, 逐级沿叶轮上的流道流动, 在提高了气流能量头后, 进入扩压器 (静止件), 进一步把速度能量头转换成所需的压力能量头, 最后由排出口排出。由于它的速度高, 压缩过程连续进行, 生产能力大, 气体又洁净, 因此非常适于大型化生产, 在近代化工厂中已广泛应用。

2. 轴流式压缩机 轴流式压缩机与离心式相同, 也是靠转动的叶片对气流做功, 不过它的气体流动方向与主轴的轴线平行, 其主要结构如图 1-5 所示。主要组成部分有动、静叶片, 转鼓及机壳。这类压缩机级中的气流路程较短, 阻力损失较小, 效率比离心式为高, 排气量也较大, 多用于燃气轮机装置及喷气式发动机上, 近代大型石油化工生产中也有采用轴流-离心组合式压缩机来处理大流量气体的压送问题。

此外, 还有一种速度式压缩机——喷射式压缩机, 图 1-6 所示为供合成氨气体循环用的喷射式压缩机的结构示意图。它的基本组成部分有: 喷射器本体、调节杆、喷嘴、混合段及

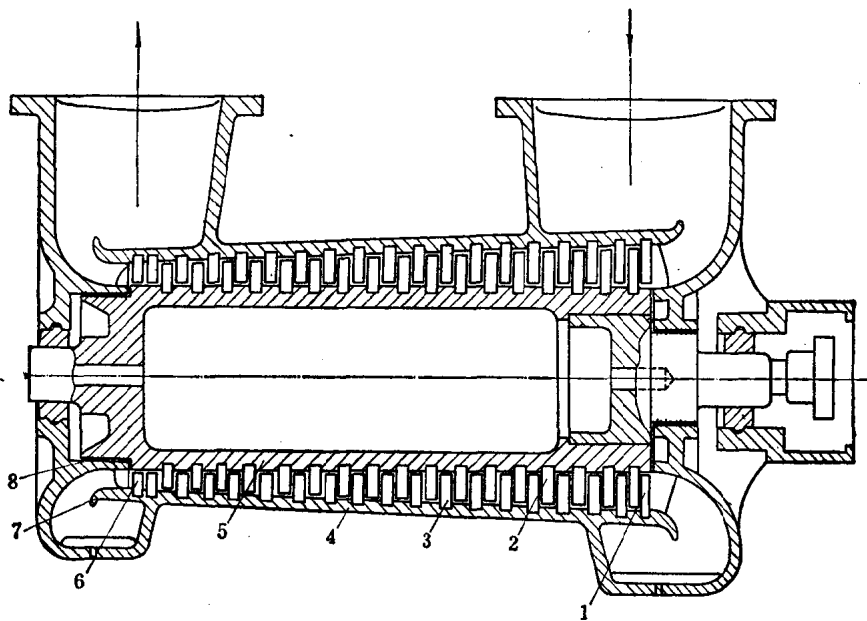


图 1-5 轴流式压缩机

1—进口导流叶片; 2—动叶片; 3—静叶片; 4—机壳; 5—转鼓; 6—整流叶片; 7—出口扩压器; 8—密封

扩压段。这类压缩机的最大优点是结构简单，几乎不大需要维修，使用寿命也较长，但由于它的效率较低，适应工况的性能较差，又需要高压的工作介质，所以使它的应用受到一定的限制。

由上述可知，由于各类压缩机的工作特点不同，它们的性能和所适用的范围也不完全一样，目前各主要机型的适用范围如图 1-7 所示。从图上不难看出，活塞式压缩机多适用于高

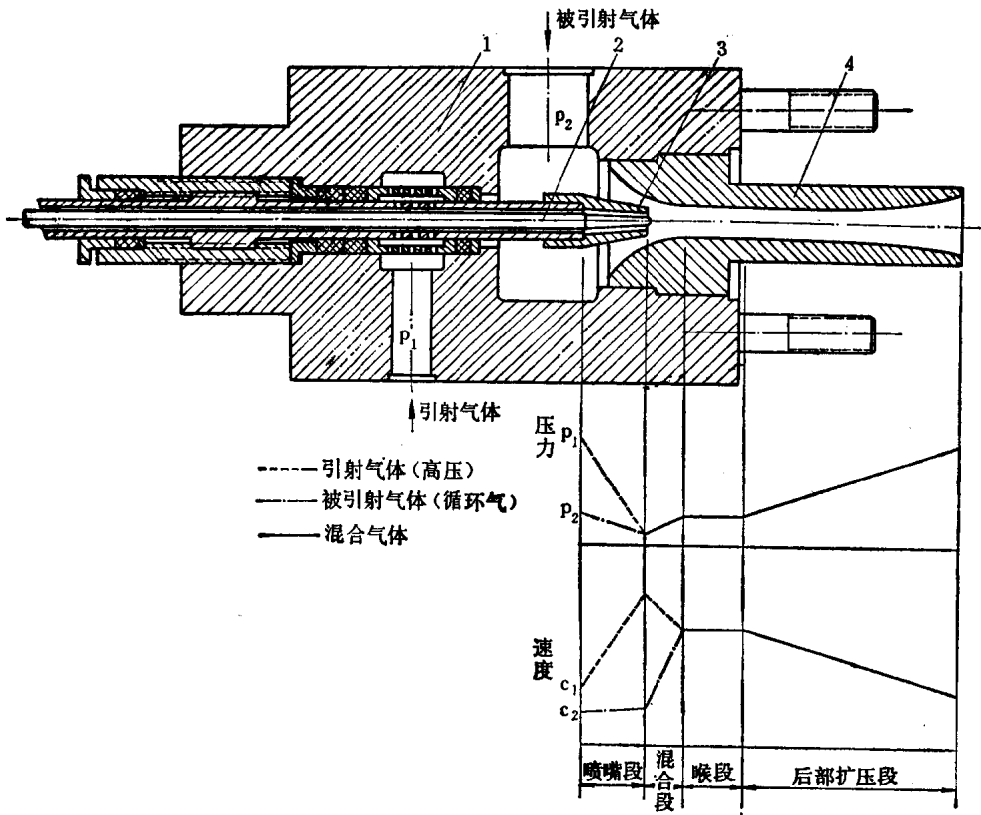


图 1-6 喷射式压缩机

1—本体；2—调节杆；3—喷嘴；4—扩压段

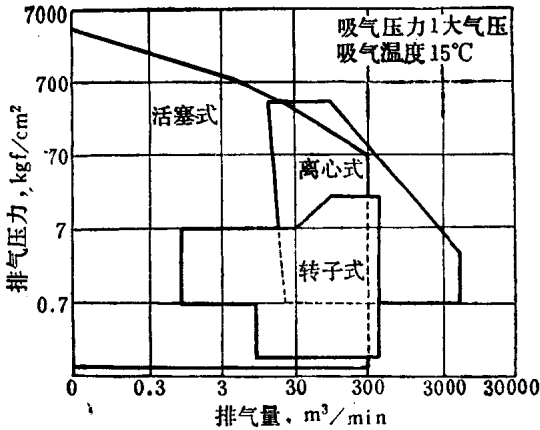


图 1-7 各类压缩机适用范围

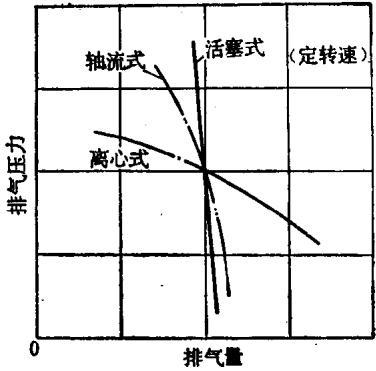


图 1-8 各类压缩机特性曲线比较

压和超高压场合；离心式压缩机多适于大流量场合；回转式压缩机虽兼有活塞式和离心式的特点，但由于它的压力和排气量有限，多适于中、小气量的场合。

二、活塞式压缩机的特点、基本构造及其附属设备

（一）活塞式压缩机的特点

1. 适用压力范围广 当排气压力波动时排气量比较稳定。活塞式压缩机可设计成超高压、高压、中压或低压。由图1-8可知在相似工作范围及等转速下当排气压力波动时，活塞式压缩机的排气量基本保持不变，而离心式压缩机随压力变化则有较大幅度的波动。轴流式压缩机则介于两者之间。

2. 压缩效率较高 一般活塞式压缩机压缩气体的过程属封闭系统，其压缩效率较高，大型的绝热效率可达80%以上。至于回转式压缩机虽属容积式，但由于内漏和流动阻力损失较大，故其效率不如活塞式压缩机。

3. 适应性较强 活塞式压缩机排气量范围较广，特别当排气量较小时，如做成离心式难度就较大。此外气体密度对压缩机性能的影响也不如离心式那样显著，所以对同一规格的活塞式压缩机往往只要稍加改造就可适用于压缩其它的气体介质。

活塞式压缩机的主要缺点是：

1. 气体带油污，特别在化工生产上若对气体质量要求较高时，压缩后气体的净化任务繁重；

2. 因受往复运动惯性力的限制，转速不能过高，对于排气量较大的，外形尺寸及其基础都较大；

3. 排气不连续，气体压力有波动，严重时往往因气流脉动共振，造成管网或机件的损坏；

4. 易损件较多，维修量较大。

（二）活塞式压缩机的基本构造及其附属设备

活塞式压缩机的结构形式虽然繁多，但其主要组成部分基本相同。一台完整的压缩机组包括两大部分：一为主机，另一为辅机。前者包括机身、中体、传动部件、气缸组件、活塞组件、气阀、密封组件以及驱动机等。后者包括润滑系统、冷却系统以及气路系统等。这里着重介绍一种化工厂常用的对称平衡式压缩机的基本结构。

对称平衡式压缩机是五十年代新发展的机型，由于优点较突出，发展十分迅速，现代大型活塞式压缩机多采用这种机型。图1-1所示为该机主机部分的直观图，图1-9为该机辅机部分的系统图。该机共有四列，分置在同一曲轴的两侧，气体分五级压缩。第Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级气缸分别配置在一、二、三列上，第Ⅳ、Ⅴ级气缸则配置在同一列上（第四列）。曲轴有四个曲拐，对置两列的曲拐相差 180° ，组成一个曲拐平面。两个曲拐平面在空间相互垂直。这种配置方式有利于抵消惯性力的影响，故称为对称平衡式。

每列都单独设置活塞组件及结构相同的传动部件（连杆、十字头），所配的中体及中间连接筒的结构也完全相同。中间连接筒是各列气缸与中体间的连接部件，在与气缸连接的一侧上设有密封填料，与中体连接的另一侧上设有刮油环。

连杆大头装配在曲柄销上，与曲轴一起作圆周旋转运动。连杆小头通过十字头销与十字头装配在一起作往复运动。

各级气缸上设有吸、排气阀以及供引导气体进、出的气道，并备有供冷却缸壁用的冷却夹套。

为了调节气量，压缩机（在第Ⅰ级气缸上）还设有气量调节器。

压缩机的气路、冷却、润滑系统可参见图 1-9 所示。每级后都设有水冷却器（根据各级压力高低，I、II 级的级间冷却器采用列管式，III、IV、V 级间的冷却器采用套管式）。各级间都设有油水分离器（I、II 级的级间冷却器、油水分离器和缓冲罐组合在同一设备中，而 III、IV、V 级的缓冲罐系单独设置）。

压缩机的润滑分成两个系统：一为机身内传动件的润滑系统，润滑曲轴、连杆、十字头等运动件上的摩擦副；另一为气缸内活塞组件往复摩擦副的润滑系统。前者多采用机油，靠齿轮泵循环润滑，后者采用压缩机油，靠高压注油器润滑。两者的供油自成系统，互不相混。

三、活塞式压缩机的种类及其型号编制

活塞式压缩机的主要类型详见下表。

分 类	型 式 名 称	参数范围或结构特点
按排气量 V_d 分 (吸气压力为大 气压力)	微 型 小 型 中 型 大 型	排气量 $V_d \leq 1\text{m}^3/\text{min}$ $1\text{m}^3/\text{min} < V_d \leq 10\text{m}^3/\text{min}$ $10\text{m}^3/\text{min} < V_d \leq 100\text{m}^3/\text{min}$ $V_d > 100\text{m}^3/\text{min}$
按排气压力 p_d 分	低压压缩机 中压压缩机 高压压缩机 超高压压缩机	$2\text{kgf}/\text{cm}^2 < p_d \leq 10\text{kgf}/\text{cm}^2$ $10\text{kgf}/\text{cm}^2 < p_d \leq 100\text{kgf}/\text{cm}^2$ $100\text{kgf}/\text{cm}^2 < p_d \leq 1000\text{kgf}/\text{cm}^2$ $p_d > 1000\text{kgf}/\text{cm}^2$
按气缸的排列 方式分	立 式 卧 式 对置式 对称平衡式 角 式	气缸中心线垂直于地面 气缸中心线平行于地面 (参见第四章) (参看图 1-1, 属对置式的一种特例) 气缸中心线互成一定角度 (参看图 1-10)
按气缸容积的 利用方式分	单作用式 双作用式 级差式	仅活塞一侧的气缸容积工作 活塞两侧的气缸容积交替进行工作 同列一侧中有二个以上不同级的活塞组装在一起进行工作
按压缩级数分	单 级 双 级 多 级	气体仅经一次压缩即达排气压力 气体经二次压缩达排气压力 气体经多次压缩 (级间有冷却器)

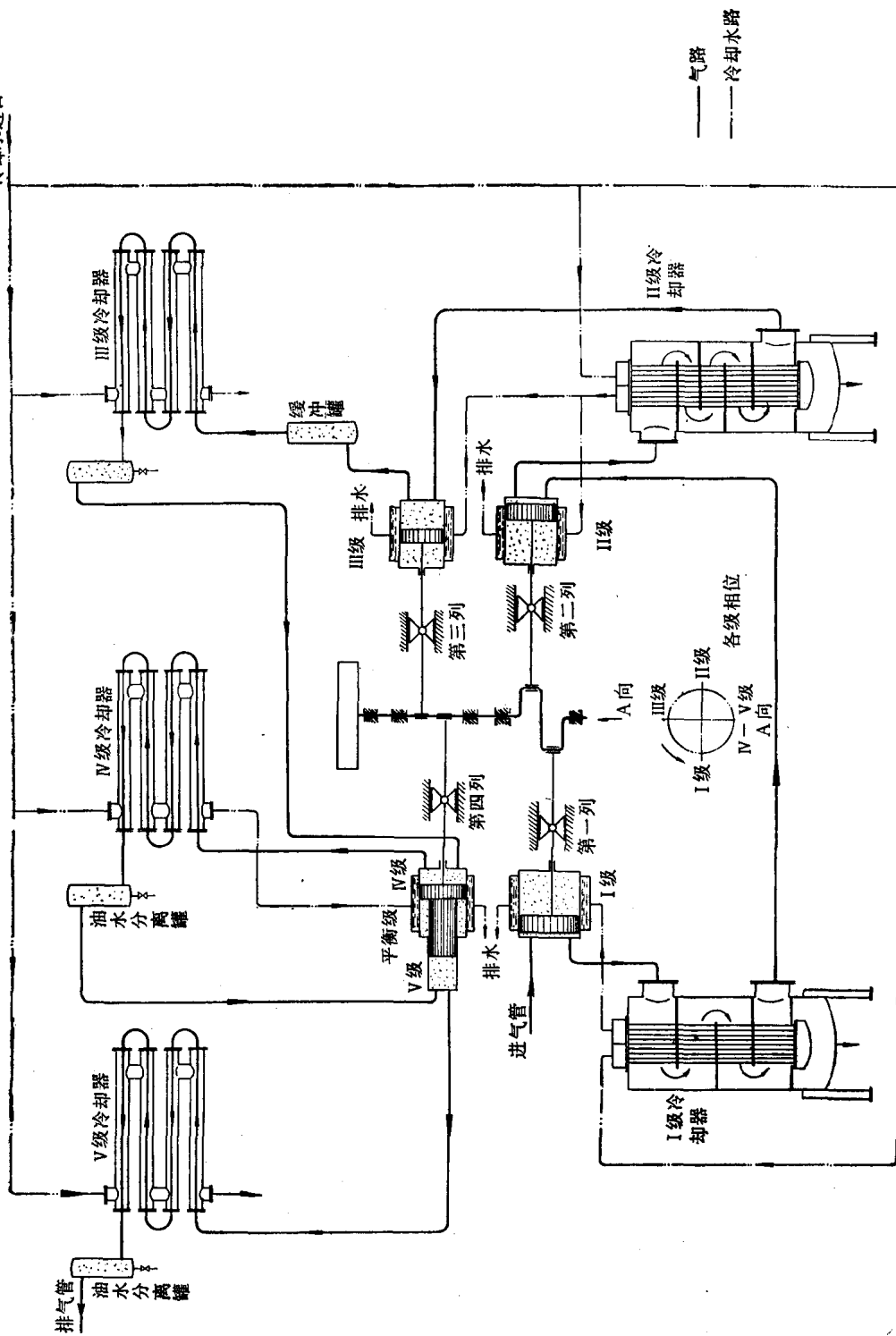
此外还可按冷却方式不同而分为风冷式和水冷式，按安装方式不同而分为固定式和移动式等。

由于活塞式压缩机品种繁多，为了便于统一，有关机型命名的规定要点（草案）如下。

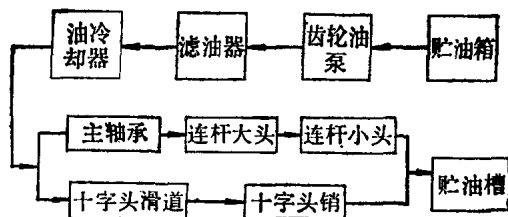
(一) 机型命名

机 型 代 号	结 构 简 介
L	气缸排列呈 L 型 (立、卧式结合)
V	气缸排列呈 V 型 (角式)
W	气缸排列呈 W 型 (角式)
Z	气缸竖立排列
P	气缸水平排列 (即 II 型排列)
M	M 型对称平衡式 (卧式、电机位于气缸的一侧)
H	H 型对称平衡式 (卧式、电机位于气缸之间)
D	对置或对称平衡式

冷却水进口



(a)



(b)

图 1-9 活塞式压缩机气路、冷却、润滑系统图
(a) 冷却、气路系统；(b) 传动机构润滑系统

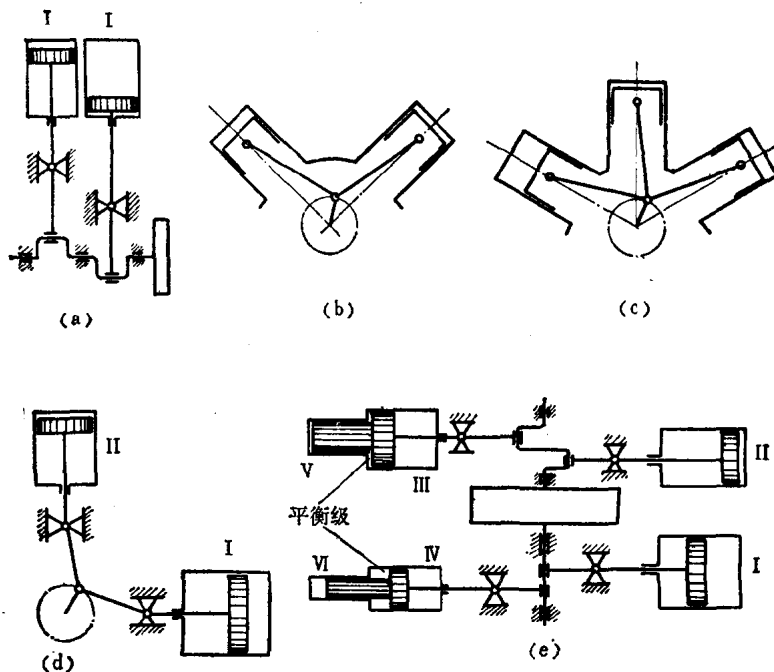


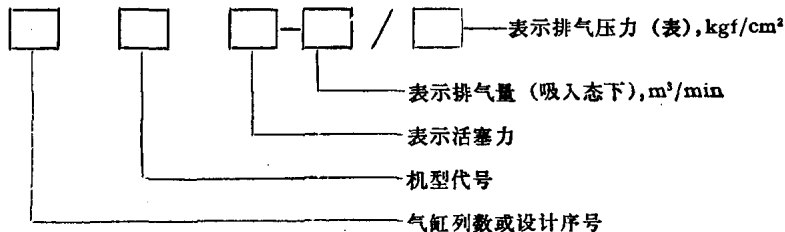
图 1-10 不同结构型式压缩机简图

(a) 立式、单级；(b) V型；(c) W型；(d) L型、双级；(e) 卧式、H型、多级

(二) L型压缩机，在机型代号前冠以数字，分别表示L系列的顺序号，如3L、4L、5L等。此外也有标以活塞力者，如L3.3、L5.5等。

(三) V、W型压缩机，在机型代号前用数目字表示气缸列数，单缸者可省去“1”。

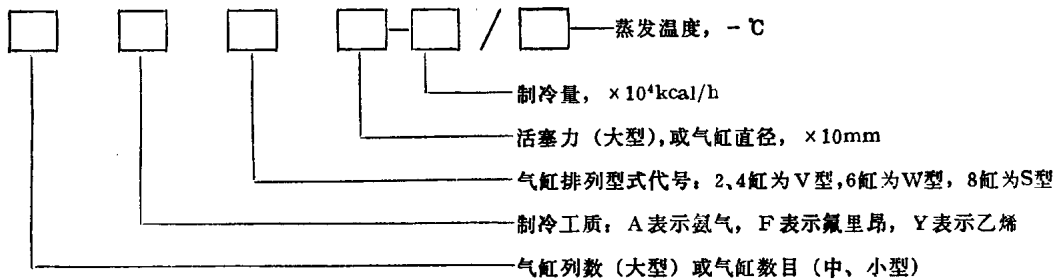
(四) Z、P、M、H、D型压缩机，在机型代号前均用数目字表示气缸列数，机型代号后用数目字代表该机列活塞力(tf)。活塞力后还以分式表示压缩机的排气量及排气压力，其标注方法如下。



如4M12-45/210, 表示该机为4列, M型对称平衡式, 活塞力为12tf, 排气量为45m³/min, 排气压力为210kgf/cm²。

又如H22-165/320, 表示该机为H型对称平衡式(四列), 活塞力为22tf, 排气量为165m³/min, 排气压力为320kgf/cm²。

(五) 关于活塞式制冷压缩机的标注



如AD15-95/20, 表示该机以氨为制冷工质, 2列D型对称平衡式, 活塞力为15tf, 制冷量为95×10⁴kcal/h (蒸发温度为-20°C)。

又6FW5-1.44/15, 表示该机以氟里昂F-22为制冷工质, 6缸W型排列, 活塞力为5tf, 制冷量为1.44×10⁴kcal/h (蒸发温度为-15°C)。

第二章 活塞式压缩机热力学基础

第一节 理想气体状态方程式和热力过程方程式

一、理想气体的热力状态及其状态参数

压缩机运转时, 气缸内气体的热力状态总是周期不断地变化, 所以要研究压缩机的工作, 首先就得解决如何定量描述气体的状态以及如何确定状态变化的过程。实际上, 这也是研究气体热力学必须首先解决的问题。

气体在各种不同热力状态下的特性, 一般都是通过气体状态参数来说明。最常用的状态参数有温度 (T)、压力 (P) 和比容 (v), 称为气体热力状态的基本参数, 此外还有内能 (u)、焓 (i) 及熵 (s) 等状态参数。后三个状态参数可从前三个基本状态参数推导出来, 称为导出状态参数。

(一) 基本热力状态参数

1. 温度 在热力学中采用绝对温标 $^{\circ}\text{K}$ 为单位。绝对温标以纯水三相点的绝对温度 273.16°K (计算时取 273°K) 作为基准, 只有绝对温度才是气体的状态参数, 与常用的摄氏百度温标 $^{\circ}\text{C}$ 应加区别。

2. 压力 在热力学中规定绝对压力为状态参数, 与一般的表压力应加区别。

3. 比容 比容是指每单位重量气体所占有的容积, 以 v 表示。比容的倒数称为重度, 以 γ 表示^①。

(二) 导出状态参数

1. 内能 气体的内能与温度及比容间存在一定的函数关系。当忽略气体分子间的作用力和气体分子本身所占有的体积时, 内能可认为是温度的单值函数。内能一般用 u 表示。

2. 焓 为了便于计算, 有时把一些经常同时出现的状态参数并在一起构成一个新的状态参数。例如在流动系统中, 常把内能 u 和压力 P 、比容 v 的乘积 pv 相加组成一个新的状态参数 i , 称为“焓”。即:

$$i = u + Apv, \text{ kcal/kg}$$

式中 u —— 内能, kcal/kg;

P —— 压力, kgf/kg;

v —— 比容, m^3/kg ;

A —— 功热当量, $A = 1/427 \text{ kcal/kgf} \cdot \text{m}$ 。

3. 熵 熵也是导出状态参数。根据热力学第二定律, 对于可逆过程的熵变, 与温度及过程进行时的热量交换有关, 其关系式为:

$$dq = Tds, \text{ kcal/kg}$$

式中 q —— 单位重量气体与外界交换的热量, kcal/kg;

T —— 交换热量时的瞬时绝对温度, $^{\circ}\text{K}$;

^①这里, 对单位重量仍沿用工程技术上习惯的“kg(f)”表示, 如比容 v 用“ m^3/kg ”, 重度 γ 用“ kg/m^3 ”, 比熵 s 、焓 i 用“kcal/kg”, 比热 c 用“kcal/kg $^{\circ}\text{C}$ ”表示等, 以便与现行手册中有关工程制的热力学图表、数据单位相一致, 便于查用。而在其他场合下, 则用“kgf”表示。不过应注意, 用“kg”表示单位重量时须与国际单位制(SI)中的质量单位“kg”相区别。