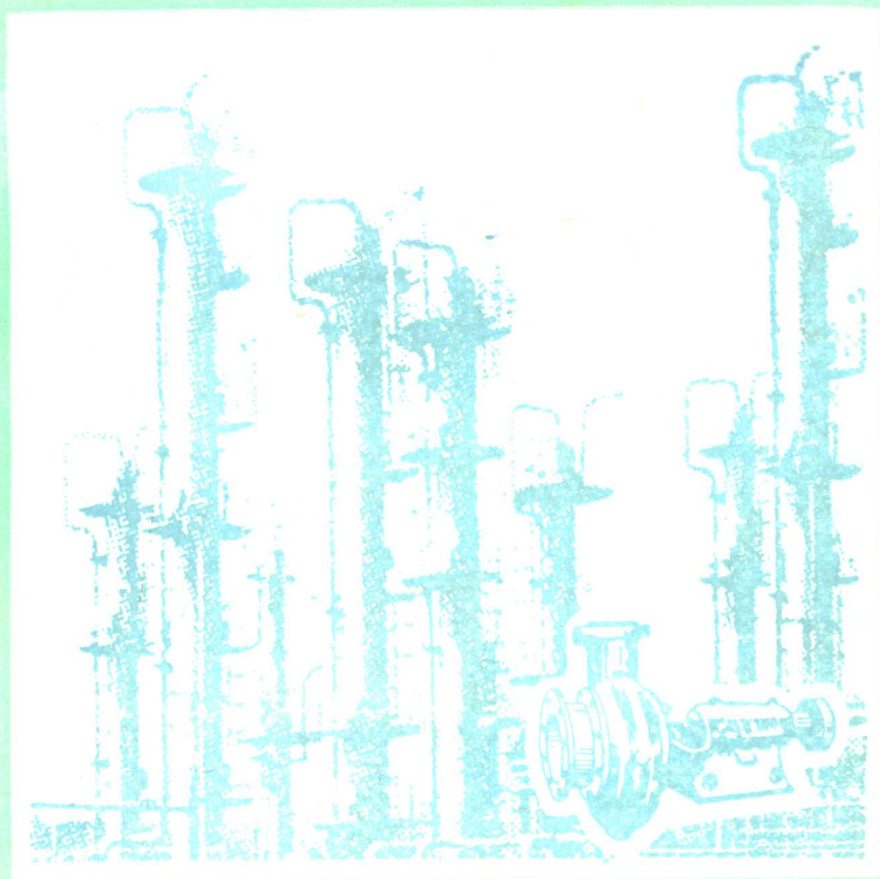




高等学校教材

化工机器

高慎琴 主编 潘永密 审定



化学工业出版社

T001
43

高等学校教材

化工机器

高慎琴 主编

潘永密 审定

化学工业出版社
· 北 京 ·

5

(京) 新登字039号

图书在版编目 (CIP) 数据

化工机器 / 高慎琴主编. - 北京: 化学工业出版社, 1992.5 (1996重印)
高等学校教材
ISBN 7-5025-0985-2

I. 化… II. 高… III. 化工机械-高等学校-教材 IV. TQ05

中国版本图书馆CIP数据核字 (95) 第15817号

出版发行: 化学工业出版社 (北京市朝阳区惠新里3号)

社长: 俸培宗 总编辑: 蔡剑秋

经 销: 新华书店北京发行所

印 刷: 北京市联华印刷厂

装 订: 三河市东柳装订厂

版 次: 1992年5月第1版

印 次: 1995年10月第3次印刷

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 35 3/4

字 数: 901千字

印 数: 16801—22800

定 价: 27.40元

前 言

本书是根据全国高等学校化工设备与机械专业教学指导委员会的教材建设规划及1988年12月关于《化工机器》课程的教学基本要求而编写。

所谓化工机器一般是指在化工（包括轻化工、石油化工及冶金等）生产中对所加工的对象进行机械作用的机械，通常也是运动的机械。化工机器种类甚多，归纳起来大致包括：介质的输送，流体的加（减）压，介质的机械分离及混合，固体的粉碎及造粒等几大部类的机械。

本书限于学时要求，只能以最常用的、最典型的机械：流体机械和分离机械，作为本书的第一篇及第二篇；而第三篇则为高速回转件的动力学和强度内容。流体机械篇以往复式压缩机、离心式压缩机及离心泵为典型；分离机械篇以离心机及过滤机为典型。

写本书的基本思想是：适当加强有关基础理论，例如热力学、气体动力学基础、过滤过程理论及转子动力学；一般介绍化工机器的多种类型及应用；重点阐明各种典型机器的工作原理、基本运算及基本性能以及影响效率的因素；分析机器的基本结构原理、主要零部件的特点等；此外，还介绍了机器的调节原理与方法，对某些故障也作了一定的剖析，并指出解决的途径。

本书的编写特点为：1. 按基本工作原理区分机器的类型，把同类机器的共同性问题适当地加以归纳，使教材具有系统性、条理性；2. 每篇中各种机器的特殊性由各自介绍，但注意以一般带特殊，前后呼应，以减少不必要的重复；3. 注意理论联系生产实际；4. 注意尽可能增加近年来的技术新成就和新内容。例如往复式压缩机动力学计算只用解析法，不用作图法；增加了过滤机；增加了流体机械辅机的内容；对高速转子临界转速的写法也有某些新的尝试；最后还增加了机器故障诊断技术一章，扼要介绍了近代新技术。

按本书进行教学时，内容可根据具体情况适当删减。同时，应有相应的实验、实习课与之配合。

本书是高等院校化工设备及机械专业的教材，也可供炼油机械、轻化工机械及矿山冶金机械等专业师生及有关工程技术人员参考。

本书由大连理工大学高慎琴教授主编。编写人有高慎琴（编写第一、二、四章及第三章第一～五节），沈阳化工学院赵纯善副教授（第三章第六～九节、第五章），陈金山副教授（第六、七、八、十及十一章）。大连理工大学邹久朋副教授第九章，浙江大学沈庆根副教授第十二章。

本书由浙江大学潘永密教授审定。他对全部书稿进行了认真、细致的审阅，提出很多宝贵意见和建议，编者对此深表感谢。

本书是在化机教学指导委员会的指导下进行编写的。化工部魏立藩总工程师也对本书的指导思想提了重要意见，大连理工大学周怀忠教授始终给予热情帮助，提出许多宝贵意见。还有其他一些同志的支持，在此一并致以谢意。

因编者水平所限，错误及欠妥之处恳请批评指正。

编者 一九九〇年七月

内 容 提 要

本书根据全国高校化工设备与机械专业教学指导委员会的《化工机器》课程教学基本要求编写。

全书分为三篇共十二章,分别介绍了几种典型流体机械及分离机械如往复活塞式压缩机、离心式压缩机、离心式泵以及离心机、过滤机的基本理论、基本结构、工作原理,热力学、流体力学及动力学计算,基本性能、调节与故障分析等,并扼要介绍近代的机器故障诊断技术。(参考学时数80)

本书为高校化工设备与机械专业教材,也可供炼油机械、轻化工机械及矿山冶金机械等专业师生及有关工程技术人员参考。

目 录

第一篇 流体机械

第一章 概述	1
第二章 热力学理论基础	11
第一节 理想气体状态方程、热力过程方程及过程功	11
第二节 实际气体状态方程、过程方程及过程功	20
第三节 能量方程	29
第三章 往复活塞式压缩机	35
第一节 概述	35
第二节 压缩机级的热力学	36
一、压缩机级的理论压缩循环	37
二、压缩机级的实际压缩循环	38
三、压缩机的排气压力及排气温度	45
四、压缩机实际压缩循环功、功率及效率	46
五、实际气体的压缩机热力学计算特点	50
第三节 多级压缩	52
一、采用多级压缩的原因	52
二、级数选择和各级压力比的分配	54
三、多级压缩机的排气量和各级气缸行程容积	56
四、泄漏系数、抽(加)气系数及凝析系数	60
五、多级压缩机的设计性热力计算	65
六、多级压缩机的复算性热力计算	66
第四节 压缩机的排气量调节	77
第五节 往复活塞式压缩机动力学	82
一、活塞的往复运动分析	82
二、往复活塞式压缩机中的作用力	83
三、往复活塞式压缩机主要构件及基础的受力分析	93
四、惯性力及惯性力矩的平衡	99
五、切向力图、总阻力矩图及飞轮矩	107
第六节 往复活塞式压缩机的总体结构及选型	122
第七节 往复活塞式压缩机的主要零部件	130
一、气缸组件	130
二、活塞组件	136
三、密封组件	144
四、气阀组件	147

五、曲轴—连杆机构	154
第八节 往复活塞式压缩机辅机系统	167
一、润滑系统	167
二、管路系统及安全装置	174
第九节 石油化工用压缩机的特点	183
第四章 离心式压缩机	187
第一节 概述	187
第二节 离心式压缩机的气动热力学	190
一、气体从回转叶轮得到的能量	190
二、级的总耗功、压缩功及功率	199
三、气体在扩压器中的能量转换	201
四、气体在蜗壳中的流动	206
五、离心式压缩机级中气体状态参数的计算	207
六、离心式压缩机的效率	212
七、多级离心式压缩机	215
八、离心式压缩机的气动热力学计算	217
第三节 离心式压缩机级中的能量损失	224
一、级中的流动损失	225
二、音速、马赫数、微弱波、激波与波阻损失	232
三、喷管、最大马赫数及临界马赫数	238
四、轮阻损失	244
第四节 离心式压缩机的性能及调节	246
第五节 相似理论及其在透平机械中的应用	259
第六节 离心式压缩机主要零部件	275
一、叶轮	275
二、密封	281
三、转子轴向力及其平衡	288
第七节 离心式压缩机典型产品示例	291
第五章 离心泵	294
第一节 概述	294
第二节 离心泵的基本方程式	298
第三节 离心泵和管路特性曲线	301
第四节 离心泵的吸入特性	305
第五节 离心泵的相似原理及其应用	312
第六节 离心泵叶轮的切割	320
第七节 液体性质对泵性能的影响	322
第八节 离心泵的运转特性及调节	328
第九节 离心泵的主要零部件	333
一、叶轮	333
二、泵过流部分的固定元件	334

三、轴向力及径向力的平衡设施	336
四、密封装置	339
第十节 典型石油化工用泵示例	344

第二篇 分离机械

第六章 概述	352
第一节 分离过程、用途及分类	352
第二节 分离物料的特性	353
一、悬浮液的特性	353
二、乳浊液的特性	354
三、固体颗粒的特性	354
第七章 离心机	359
第一节 概述	359
第二节 离心机的类型、结构及操作原理	364
一、过滤式离心机	364
（一）三足式离心机	364
（二）上悬式离心机	366
（三）卧式刮刀卸料离心机	368
（四）卧式活塞卸料离心机	370
（五）离心惯性力卸料离心机	375
二、沉降式离心机	376
三、分离机	384
（一）管式离心机	384
（二）室式离心机	386
（三）碟式离心机	386
第三节 离心机的生产能力	390
第四节 离心机的功率计算	398
第八章 过滤机	405
第一节 概述	405
第二节 过滤过程基本方程式	406
第三节 滤饼的洗涤	413
第四节 过滤介质	415
第五节 过滤机	418
一、真空过滤机	418
二、压滤机	425
三、带式压滤机	434
第六节 分离机械的选型	440

第三篇 高速转子轴的临界转速及回转件的振动、强度

第九章 高速转子轴的临界转速	449
-----------------------	-----

第一节 概述.....	449
第二节 计算临界转速的解析法.....	451
√ 一、特征值法.....	451
二、影响系数法.....	457
三、考虑某些因素对临界转速的影响.....	463
第三节 计算临界转速的近似法和数值法.....	477
一、瑞利法.....	477
√ 二、邓克莱法.....	482
√ 三、传递矩阵法.....	484
第十章 高速转子的振动及隔振	497
第一节 转子的平衡.....	497
一、静平衡.....	497
二、动平衡.....	498
第二节 离心机的隔振.....	501
√ 第十一章 转鼓与转盘的强度计算	507
第一节 离心机转鼓的强度计算.....	507
一、转鼓壁的应力.....	507
二、转鼓的变形.....	512
三、转鼓壁的强度计算.....	513
四、边缘应力问题.....	517
第二节 高速转盘的强度计算.....	519
一、转盘的应力与应变的基本方程式.....	519
二、等厚度轮盘的应力计算.....	521
三、锥形轮盘的应力计算.....	525
四、轮盘内外径比和厚度比.....	527
五、高速组合转盘的应力计算——二次算法.....	528
第十二章 机器故障诊断技术简介	533
第一节 概述.....	533
第二节 机器故障诊断的主要环节及技术基础.....	534
一、热红外分析技术.....	534
二、声发射技术.....	535
三、润滑油的光谱、铁谱分析技术.....	535
四、噪声分析.....	536
第三节 机器振动故障的诊断方法.....	536
第四节 机器故障诊断的技术发展.....	542
附录	549
一、常用气体的主要物理性质.....	549
二、常用气体压缩因子 Z 值曲线图.....	551
三、机械工业部部标准JB2589《容积式压缩机型号编制方法》(草案).....	557

四、活塞式压缩机的活塞力与主要结构参数表.....	558
参考文献.....	559

第一篇 流体机械

第一章 概 述

流体机械是以流体为工作介质进行能量转换的机械。广义的流体机械应包括两类：一类是将流体的能量转换为动力能的机械，称为原动机，例如：水轮机、汽轮机、燃气轮机及蒸汽机等；一类是将原动机的动力能传给流体以增加流体的能量的机械，称为工作机，例如泵及压气机等。这两类机械的理论基础、作用原理以至基本结构型式都基本相同，只是所进行的过程相反，所起的作用也是相反的。前者是经过机器后工质的压力有所降低的机械，后者是介质的压力有所增加的机械。本篇阐述的流体机械只是工作机。但可以相信在学好工作机后对原动机也就不会完全陌生了。

一、流体机械的分类

基本上有以下两种分类方法。

(一) 按所用流体的种类分

加压或输送液体的流体机械统称为泵，加压或输送气体的称为压气机，而压气机中根据排气压力的等级不同通常又分为压缩机（排气压力 $p > 3 \times 10^5 \text{Pa}$ ）、鼓风机 $0.15 \times 10^5 \text{Pa} < p < 3 \times 10^5 \text{Pa}$ ）及通风机（ $p < 0.15 \times 10^5 \text{Pa}$ ），还有真空泵（进气压力小于环境大气压力）。

(二) 按工作原理分

按提高流体压力的工作原理主要可分为：

1. 容积式流体机械 利用活塞、柱塞或各种形状的转子等元件在流体机械内部空腔中对流体进行挤压，使流体压力提高并排出的机械。其中又根据挤压元件的运动方式而分为往复运动式和回转运动式。往复式有往复活塞（或柱塞）泵、往复压缩机和膜片式压缩机等。回转式有螺杆泵及螺杆压气机、罗茨鼓风机、涡线压气机、滑片式压缩机，还有齿轮泵和液环泵等。

2. 透平式流体机械 依靠高速旋转叶轮的动力学作用使流经叶轮流道的流体增加速度和压力，并在以后的流道中，部分速度能又转化为压能的流体机械，也有称为动力式或速度式流体机械。按流体在机械内的流动方向又分为：

(1) 径流式 流体主要是在与机械轴相垂直的平面内流动，例如：离心泵、离心风机及离心式压缩机等。

(2) 轴流式 流体平行于机械轴而流动，例如：轴流泵、轴流风机及轴流式压缩机等。

(3) 混流式 流体的流动型式介于径流式和轴流式之间，例如混流泵和混流式风机等。

3. 其它型式的流体机械 例如喷射器、空气扬水器、酸蛋等特殊型式的流体机械。

二、气体压缩机

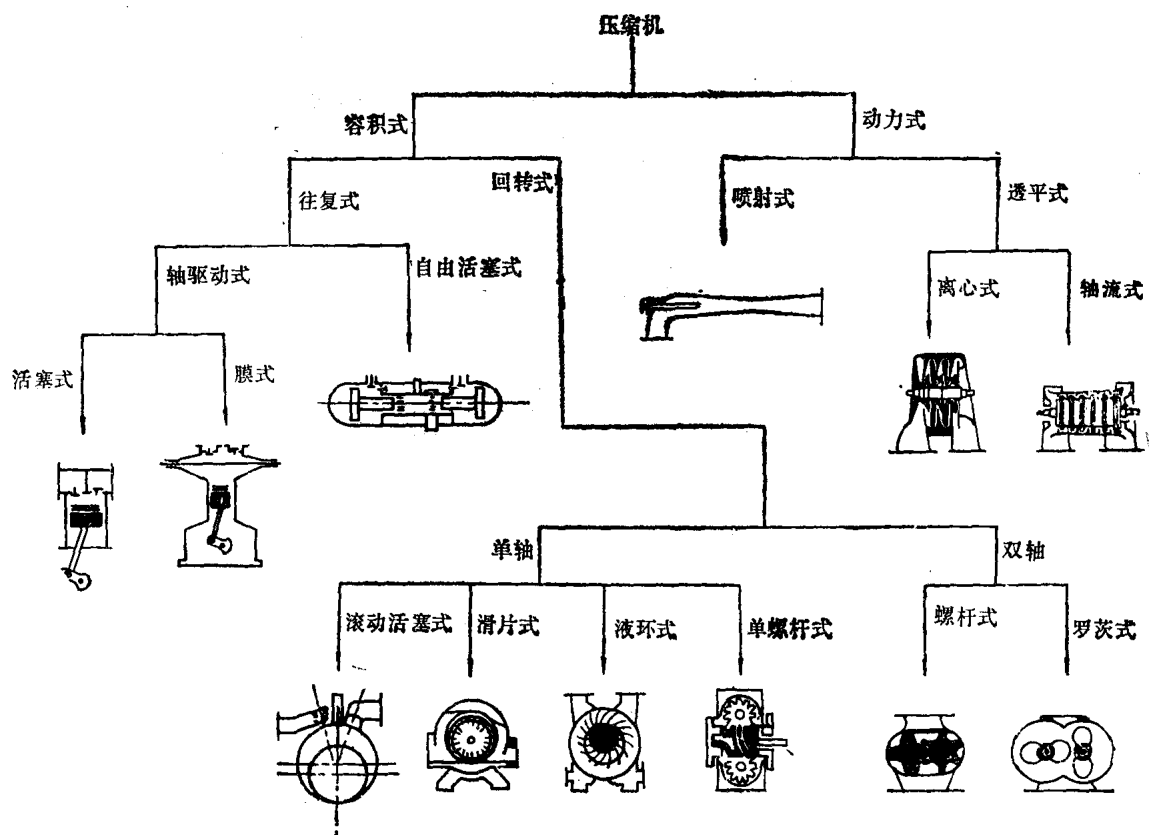
气体压缩机的分类及结构特征示于图1-1（其中有的属于鼓风机）。

现将其中几种工业上常用的压缩机基本型式、优缺点及应用简述于下。

（一）压缩机的基本型式

1. 往复活塞式压缩机

图1-2是一个卧式四列五级对动式往复活塞式压缩机，是依靠气缸内活塞的往复运动来压缩气体，气缸上有控制气体进入及排出的气阀。压缩级数多，则排气压力高；气缸数多，一般列数也多。压缩机的列数可以连杆的数目为标志；一列可以有一个气缸，也可以有多个气缸。



2. 螺杆式压缩机

图1-3所示为一螺杆压缩机，阴、阳螺杆在‘∞’字形缸体内互相啮合，由轴端的同步齿轮带动回转。阴、阳转子间有微小间隙，相互不接触。由吸入口吸进的气体被封闭在阴、阳螺杆的螺齿之间，随着转子的旋转而容积逐渐减小，使气体压力上升，阴、阳转子和缸体之间的空间和排气口连通，气体就从排气口送出。

3. 罗茨式鼓风机

图1-4是罗茨式鼓风机的示意图，其回转方式和螺杆式相同，也是由同步齿轮传动；所

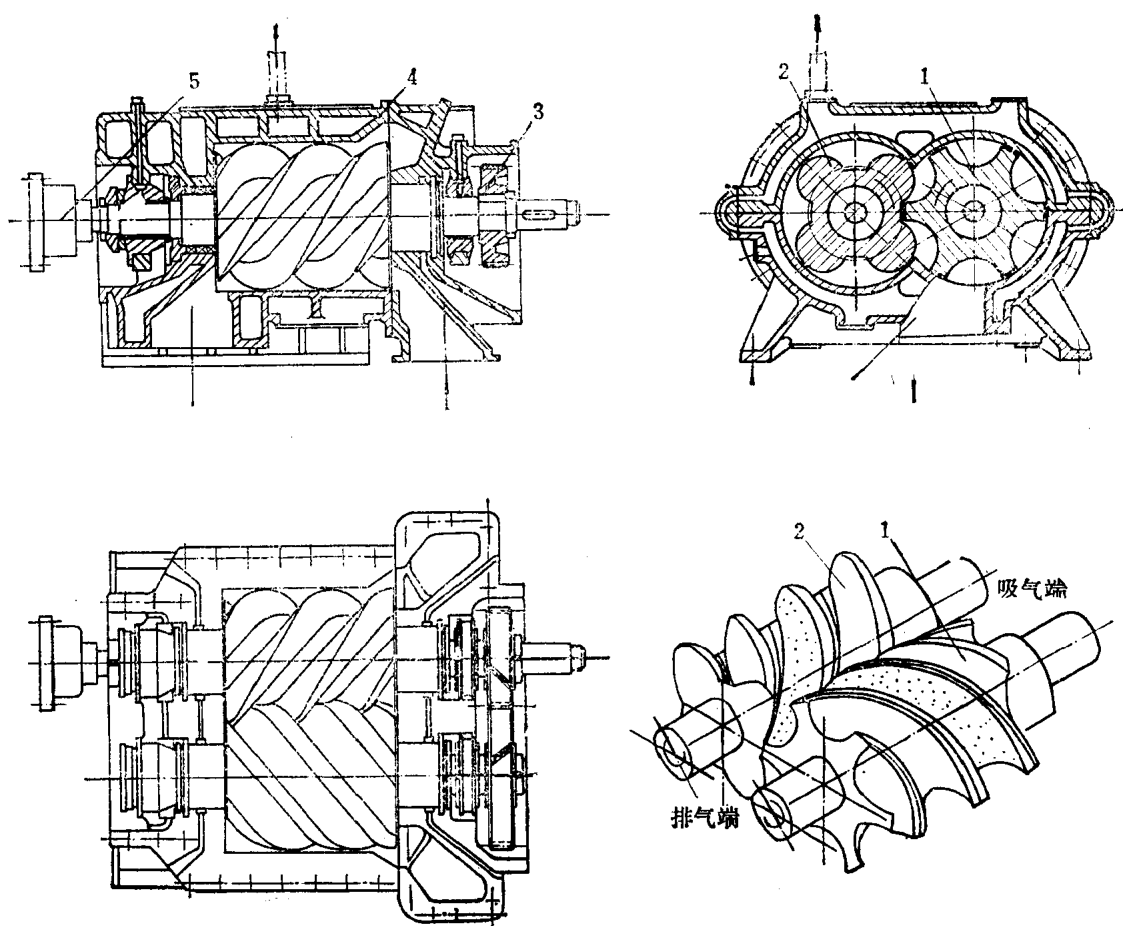


图 1-3 螺杆式压缩机

1—阴螺杆；2—阳螺杆；3—啮合齿轮；4—机壳；5—联轴节

不同的是挤压气体的元件是两个互成 90° 的8字形转子。气体经转子和缸体间的密闭空间后压出，气体在转子旋转过程中无内压缩。

4. 离心式压缩机

图1-5所示为一台四级离心式压缩机的垂直剖面图，机壳内主轴上装有四个叶轮，叶轮外周装有四个扩压器等固定元件，构成四个基元级。气体被吸入第一级受到该级的高速回转叶轮的作用得到能量后又进入扩压器进一步提高压力，然后进第二级，压力逐级地提高，最后从排气口排出。

5. 轴流式压缩机

轴流式压缩机与离心式相同，也是靠高速旋转的叶片对气体做功，不过气体流动的方向与主轴轴线平行，如图1-6所示，主要组成部分是装在转鼓上的动叶栅和装在机壳上的静叶栅。动叶对气体做功，静叶使气体导流和扩压，一组动叶栅和一组静叶栅构成一个基元级。

以上是工业上常用的几种主要压缩机。使用压缩机的场合多种多样，对压缩机的排气量和压力范围要求也各不相同，因此至今多种型式的压缩机并存，在不同情况下发挥各自的特点，图1-7表示各种压缩机的应用范围。

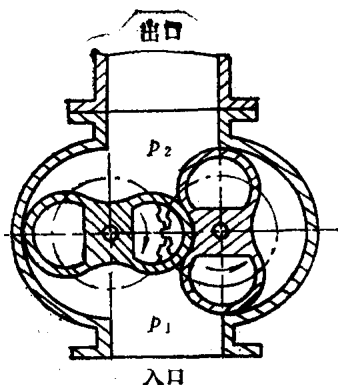


图 1-4 罗茨式鼓风机

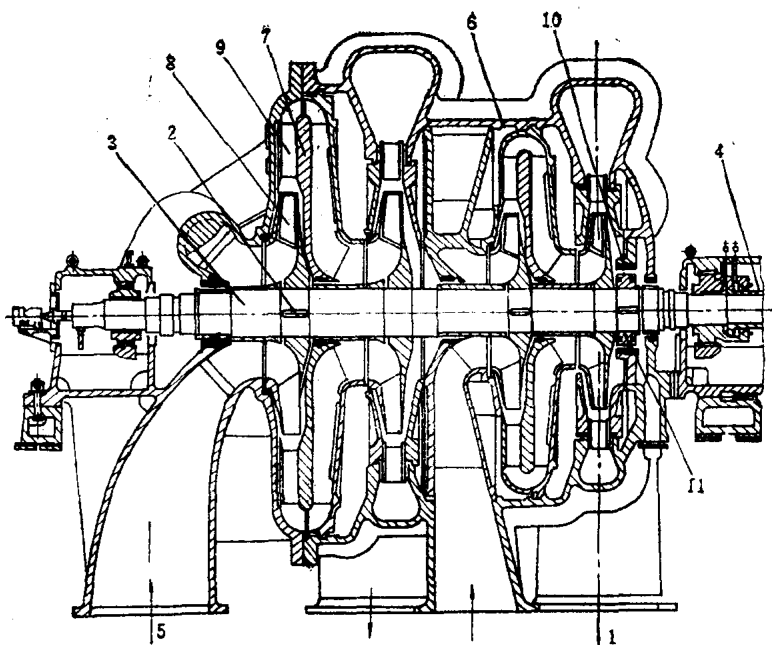


图 1-5 离心式压缩机

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

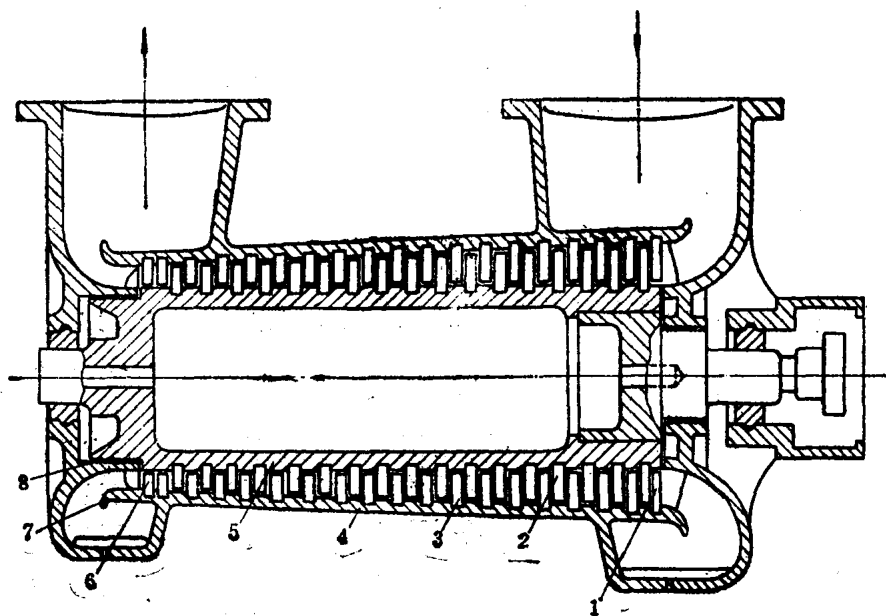


图 1-6 轴流式压缩机

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

(二) 各种压缩机的特点与比较

往复活塞式压缩机的特点是：

(1) 适用压力范围广 超高压、高压、中压、低压（包括真空）均可，而以用于高压最

为优越。目前工业装置上已能达到350MPa, 实验室中已达到1000MPa的压力水平。

(2) 效率高 大型压缩机绝热效率在80%以上;

(3) 适应性较强 排气量范围较广, 在小排气量下也能保持较高效率; 而且排气量受排气压力波动的影响很小。此外气体密度对压缩机性能的影响也不太显著, 故机器的通用性好。

存在的主要缺点是:

(1) 结构较复杂, 易损件较多, 检修工作量大;

(2) 由于受往复惯性力的限制, 转速较低, 故单位排气量的机器体积和质量相对较大, 基础也较笨重;

(3) 一般气缸内要用油润滑, 使气体带油, 致使压缩后气体的净化任务繁重;

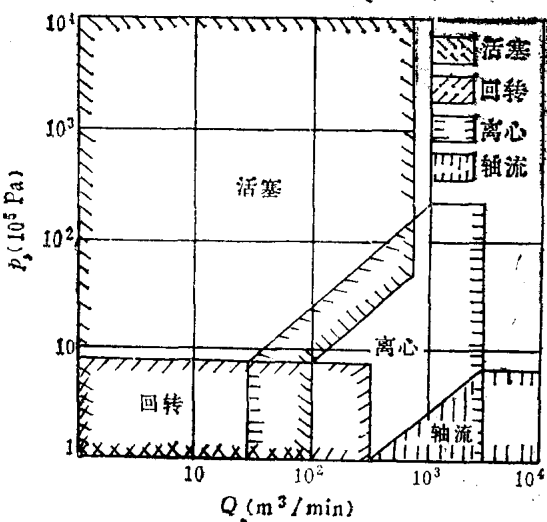


图 1-7 目前各类压缩机的应用范围

(4) 排气不连续, 造成气流脉动, 严重时产生气流脉动共振, 造成管网或机件的损坏。

透平式压缩机的特点是:

- (1) 转速高, 处理气量大, 单位排气量的机器体积小, 质量轻;
- (2) 结构较简单, 易损零件少, 检修方便, 机器运转率高;
- (3) 排气平稳; 气体不受润滑油污染。

存在的主要缺点是:

(1) 效率一般不如往复式压缩机高 (尤其对于小流量, 效率过低, 不宜采用离心压缩机)。但如果用汽轮机或燃气轮机直接驱动离心式压缩机, 机组总的经济性还是令人满意的;

(2) 随着操作条件及气体性质的变化, 压缩机性能的变化较大, 即机器的通用性较差;

(3) 机器的操作技术要求较高; 机器运转时, 噪音较大。

除了以上两种主要压缩机型式以外, 还有回转式容积压缩机, 其特点是: 结构简单, 操作方便; 转速较高, 故机器比较紧凑; 气流稳定; 比功率近年来已有明显改进。其中螺杆式压缩机的比功率已接近活塞式压缩机水平, 得到广泛的应用。此外, 近年来出现一种涡线型容积式回转压缩机, 其体积小, 效率高, 运转平稳, 已受到愈来愈多的重视, 在小型压缩机中很有应用前景。

比较各类压缩机的特点, 可知往复式压缩机适用于压力为高、中压及超高压等级, 流量为中、小流量范围。透平式压缩机则适用于中、低压等级及大、中流量范围; 其中离心式压缩机的压力等级已逐渐接近高压往复式压缩机, 轴流式压缩机适用于低压及更大的流量。回转式压缩机主要用于低压及中、小流量范围。

(三) 压缩机的应用

压缩机已成为国民经济各个部门中的重要通用机械。在化工生产中大型往复式及离

心式压缩机则成为关键设备。压缩机的应用有以下几方面：

1. 化工及石油加工工艺用

化工生产中经常需将气体压力提高，以利于化学反应。例如化肥生产中氨的合成要求把氢、氮合成气加压到15MPa或24MPa以至32MPa以上；尿素生产中需将二氧化碳加压到15MPa；石油裂解加氢要求把氢气加压到15MPa或32MPa；高压聚乙烯的聚合反应要求把乙烯气加压到250MPa甚至更高，这些场合都使用往复活塞式及离心式压缩机。

2. 动力工程用

矿山、机械及国防工业常用压缩空气作为风动机械的动力气源，要求空气压力为0.6~1.5MPa，气动控制仪表及自动化装置需要压力为0.6MPa的空气源。海上油田注气用压缩空气压力高达70MPa。

3. 制冷工程和气体分离用

冰箱、冷库和空调器等制冷装置中却不可缺少压缩机，压缩机在这里的作用是提高气态制冷工质的压力来提高其冷凝温度以便构成制冷循环。现用制冷工质有氨及氟里昂等，普通制冷压缩机的压力一般为0.8~1.4MPa。

将空气分离成氧和氮的空分装置中有空气压缩机及氧气压缩机。按空分流程的不同，所需的压力有0.5~0.6MPa、1.5~2.5MPa及15~22MPa等多种，所以压缩机需满足工艺上对压力的要求。

4. 气体输送用

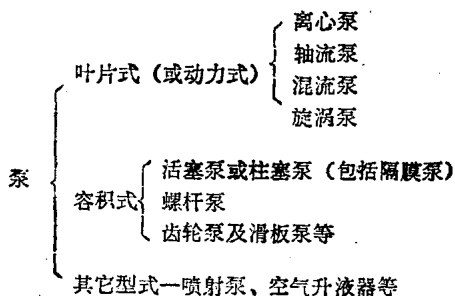
为克服气体在流动过程中的阻力损耗需用压缩机或鼓风机给气体补充能量。远程输送煤气的压缩机压力可达3MPa。气体充瓶需用压缩机，一般氧气瓶压力为15MPa，二氧化碳瓶为5~6MPa。循环压缩机也是为了弥补气体在设备及管路中循环流动导致压力降低而设立的增压机械。

三、泵

泵是液体的加压与输送机械。泵的作用原理、基本结构型式和对应的气体压缩机十分相似，只是因为液体的不可压缩性以及液体在一定条件下有汽化现象发生，所以在结构和性能上还有一些自己的特点。

1. 泵的类型

对应气体压缩机的主要类型，泵也有以下类似的型式：



其中往复泵的剖面图如图1-8所示。离心泵见图1-9。

2. 泵的应用