

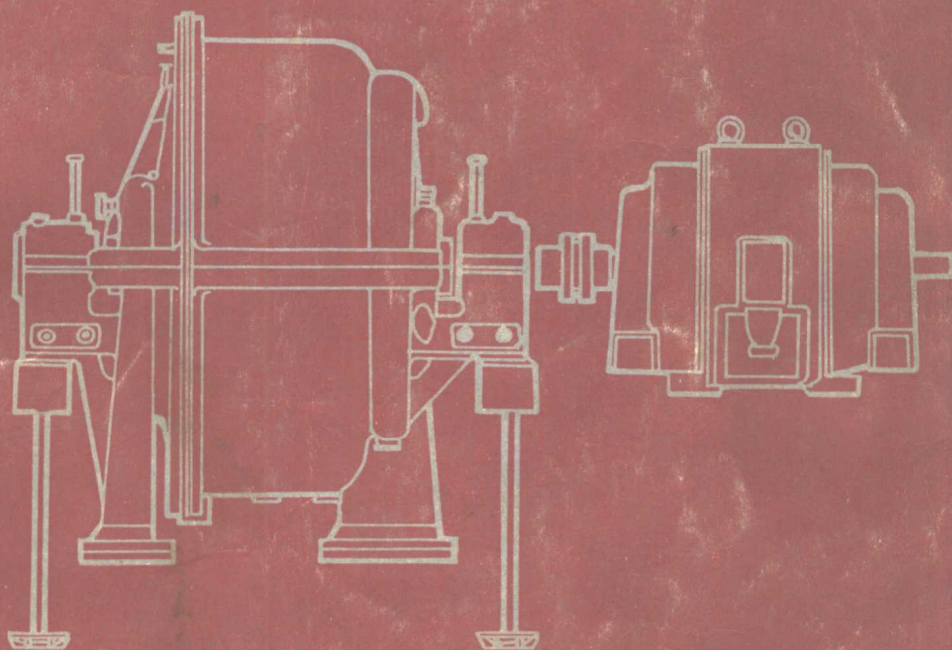
HUA GONG JI QI

高等学校试用教材

方子严 石予丰 主编

化工机器

武汉化工学院 青岛化工学院 南京化工学院等 合编



湖北科学技术出版社

TQ05

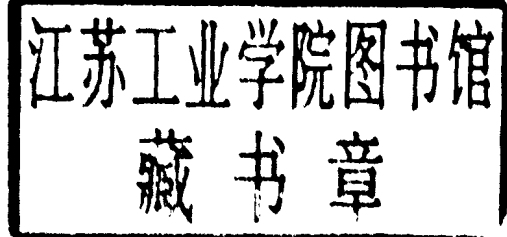
28

高等学校试用教材

化 工 机 器

武汉化工学院 青岛化工学院 南京化工学院等合编

方子严 石予丰 主编



湖北科学技术出版社

高等院校试用教材

化 工 机 器

武汉化工学院 青岛化工学院 南京化工学院等合编

方子严 石子丰 主编

湖北科学技术出版社出版 新华书店湖北发行所发行

湖北省新华印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 31.5印张 790,000字

1986年12月第1版 1987年2月第1次印刷

ISBN 7-5352-0005-2/TQ.0001

统一书号: 15304·136

印数: 1—7,000 定价: 6.00元

前 言

根据当前高等工科院校化工机械专业教材的需要,由武汉化工学院、青岛化工学院、南京化工学院等院校共同编写了这本《化工机器》教材,其中武汉化工学院担任主编工作。本教材是在近几年来教学实践的基础上,结合化工机械专业的教学改革要求,以化工机器的原理、设计与应用相结合为特点进行编写的。本书为便于读者自学,加强了物理概念的叙述,增多了例题,同时全部采用国际单位制,并增加了计算机应用方面的内容。

本书主要以高校化工机械专业本科为对象,并兼顾大专、职工大学、电大,也可作为工程技术人员参考。

本书各章编写人员:第一、二、三、五章是青岛化工学院任隆华。第四、六章是武汉化工学院彭成澈。第七、八、十、十一、十二、十三章是青岛化工学院杜永新。第十四、十五、十六章是武汉化工学院石予丰。第九、十七、十八、十九、二十章是武汉化工学院方子严。第二十一、二十二章是南京化工学院金永熙。第二十三、二十四、二十五章是青岛化工学院戚平升。

本书由武汉化工学院方子严、石予丰主编。

本书由青岛化工学院季中主审。

在编审工作中,武汉化工学院、青岛化工学院、南京化工学院的领导非常重视,湖北科学技术出版社的领导给予了大力支持,特此一并表示感谢。

由于编者水平有限,缺点错误在所难免,请读者批评指正。

编 者

1985年12月

目 录

第一篇 活塞式压缩机

第一章 概 述	1
第一节 压缩机的应用与分类.....	1
第二节 活塞式压缩机的结构、种类及型号编制.....	3
第二章 活塞式压缩机热力基础	7
第一节 气体的热力性质.....	7
第二节 活塞式压缩机的工作循环.....	13
第三节 压缩机的排气量.....	19
第四节 功率与效率.....	27
第五节 多级压缩.....	34
第六节 压缩机的变工况及其计算.....	45
第七节 热力计算示例.....	49
第三章 活塞式压缩机动力分析	54
第一节 压缩机的作用力分析.....	54
第二节 综合活塞力图的绘制.....	62
第三节 切向力图分析及飞轮矩的确定.....	69
第四节 压缩机的动力平衡.....	77
第五节 动力计算示例.....	88
第四章 活塞式压缩机的总体结构	99
第一节 压缩机结构型式及选择.....	99
第二节 压缩机主要结构参数的选取.....	105
第三节 列数的选择和级在列中的配置.....	107
第四节 石油、化工用压缩机的特点及“三化”.....	108
第五章 活塞式压缩机的主要工作部件	115
第一节 气 缸.....	115
第二节 活塞组件与填料函.....	122
第三节 气 阀.....	131
第六章 活塞式压缩机的运转	135
第一节 排气量调节.....	135
第二节 压缩机的润滑.....	140
第三节 气流脉动与管路振动.....	145

第二篇 泵

第七章 概 述	151
第一节 泵的定义与分类.....	151
第二节 泵的应用.....	151
第八章 离心泵的基本原理及特性	153
第一节 离心泵的工作原理及分类.....	153
第二节 离心泵的基本方程式.....	157
第三节 叶轮的叶片出口安置角 β_{2A} 对理论能头的影响	162
第四节 有限叶片数对理论能头的影响.....	164
第五节 离心泵的各种损失和效率.....	166
第六节 离心泵的性能曲线.....	169
第七节 离心泵的汽蚀及吸入特性.....	171
第九章 离心泵的相似原理及其应用	181
第一节 离心泵的相似及相似定律.....	181
第二节 离心泵的比转数.....	186
第三节 离心泵叶轮的切割.....	188
第四节 汽蚀相似定律和汽蚀比转数.....	191
第十章 离心泵的主要零部件及作用原理	193
第一节 叶 轮.....	193
第二节 蜗壳与导叶.....	194
第三节 作用于叶轮的轴向力、径向力及其平衡.....	196
第四节 密封装置.....	202
第十一章 石油化工用泵及其选用	213
第一节 输送粘性液体时离心泵的性能换算.....	213
第二节 离心泵的型号及系列化.....	219
第三节 离心泵的选用.....	223
第四节 石油化工用离心泵的结构示例.....	225
第十二章 离心泵的运行	228
第一节 离心泵在管路中的工作.....	228
第二节 离心泵的流量调节.....	230
第三节 离心泵的串、并联工作.....	232
第十三章 其它类型泵	234
第一节 往复泵.....	234
第二节 齿轮泵.....	241
第三节 水环式真空泵.....	245
第四节 旋涡泵.....	250

第三篇 离心式压缩机

第十四章	概 述	253
第一节	离心式压缩机的应用.....	253
第二节	离心式压缩机的结构及工作原理.....	253
第十五章	气体在级中流动的基本方程及基本概念	258
第一节	连续性方程.....	258
第二节	欧拉方程.....	259
第三节	焓值方程.....	262
第四节	柏努利方程.....	266
第五节	级的压缩功、总耗功及功率.....	266
第六节	级效率.....	269
第十六章	气体在级中的能量损失	272
第一节	流动损失.....	272
第二节	马赫数对流动损失的影响.....	275
第三节	级的性能曲线.....	281
第四节	轮阻损失.....	284
第五节	漏气损失.....	287
第十七章	离心式压缩机的主要零部件	292
第一节	叶 轮.....	292
第二节	扩压器.....	305
第三节	作用于叶轮的轴向力及其平衡.....	310
第四节	轴封装置.....	314
第五节	轴 承.....	318
第十八章	离心式压缩机的设计计算	326
第一节	中间冷却与分段.....	326
第二节	离心压缩机的气动——热力设计概要.....	330
第三节	设计计算示例.....	333
第十九章	离心式压缩机的相似原理及其应用	341
第一节	离心式压缩机的相似与相似条件.....	341
第二节	相似原理的应用.....	348
第二十章	离心式压缩机的性能曲线和调节	357
第一节	离心式压缩机的性能曲线.....	357
第二节	离心式压缩机与管路的联合运行.....	360
第三节	喘振及防喘振调节.....	362
第四节	离心式压缩机的串联和并联工作.....	366
第五节	离心式压缩机的工况调节.....	368
第二十一章	叶轮的强度计算	373

第一节	回转圆盘的强度分析	373
第二节	等厚度圆盘和锥形圆盘的应力计算	375
第三节	离心式压缩机叶轮的应力计算	380
第四节	过盈和松动转速的计算	387
第五节	用有限元法计算叶轮中的应力	392
第二十二章	转子的临界转速	405
第一节	基本概念	405
第二节	影响系数法	409
第三节	能量法	412
第四节	普洛尔法	421
第五节	转子临界转速的简便计算法	427
第六节	影响临界转速的其它因素	430
第七节	微机在普洛尔法中的应用	438

第四篇 离心机

第二十三章	概 述	443
第一节	离心机的分离过程	443
第二节	分离因数及离心力场的特点	443
第三节	离心机的分类	446
第二十四章	活塞卸料离心机	448
第一节	活塞卸料离心机的结构及工作原理	448
第二节	转鼓壁的强度计算	451
第三节	离心机的功率计算	459
第四节	转子的平衡与离心机的隔振	466
第二十五章	其它离心机的简介与选用	471
第一节	间歇运转离心机	471
第二节	连续运转离心机	472
第三节	高速离心机	479
第四节	离心机的选用	481

附录

附表

附表一	国际制单位与公制工程单位对照换算表	483
附表二	常用气体的主要物理性质	484
附表三	离心泵型式、型号对照表	486
附表四	计算转子临界转速的函数 $\phi(\xi)$ 表	487

附图 常用气体可压缩性系数 ξ 图

附图一	空气、甲烷的可压缩性系数图	488
-----	---------------	-----

附图二	氮气、氢气的可压缩性系数图	489
附图三	氧气的可压缩性系数图	489
附图四	二氧化碳的可压缩性系数图	490
附图五	乙烯的可压缩性系数图	491
附图六 (A)	压缩性系数通用图	492
附图六 (B)	压缩性系数通用图	493

第一篇 活塞式压缩机

第一章 概 述

第一节 压缩机的应用与分类

一、压缩机的应用

压缩机是一种压缩气体提高气体压力或输送气体的机器。早在三千多年前，勤劳的中国人民便掌握了鼓风冶炼技术。当时用的鼓风设备就是一种属于容积式的“压缩机”的原始雏型。还有，某些地方至今还沿用的“风箱”，与活塞式压缩机就更相象了。今天，在国民经济各个领域中的应用压缩机就更为广泛，特别在石油、化工、冶金、矿山及国防工业中已成为必不可少的关键设备。其主要的场合有：

1. 化工生产中的应用

例如在合成氨的生产中，根据生产工艺的要求必须将原料气在不同的压力和温度下进行净化、合成(合成要加压到 $320 \times 100kPa$)。又如高压聚乙烯的聚合反应要求把乙烯加压到 $2000 \times 100kPa$ 以上。除此以外，制冷和气体分离等也离不开压缩气体。

2. 动力工程上的应用

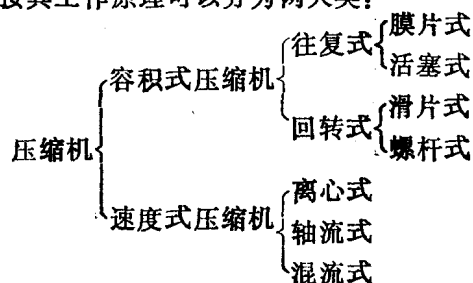
以压缩空气作为动力气源来驱动各种风动机械、风动工具在冶金、机械工业中广泛被采用着，要求空气的压力为 $(7 \sim 8) \times 100kPa$ ；用于控制仪表及自动化装置上的气源压力为 $6 \times 100kPa$ ；车辆刹车、门窗启闭要求压力为 $(2 \sim 4) \times 100kPa$ ；国防工业中某些武器的发射、潜水艇的沉浮、鱼雷的发射驱动等都需要压缩空气。

3. 气体输送

在石油、化工生产中，许多原料气要输送，常用压缩机增压。例如远程管道输送煤气时，压力可达 $30 \times 100kPa$ 。氧气厂生产的氧气要加压到 $150 \times 100kPa$ 。装瓶后再供给用户。此外，在化工生产中为了使系统内未反应气体循环再用，常用循环压缩机加以增压。

二、压缩机的分类

压缩机的种类很多，按其工作原理可以分为两大类：



1. 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变化，使气体容积缩小，气体的密度增加，从而提高气体的压力。

容积式压缩机根据其特点不同，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。它是应用最早和最广泛的一种机型。图 1-1 所示为一台我国自行设计与制造的 L 型空气压缩机。

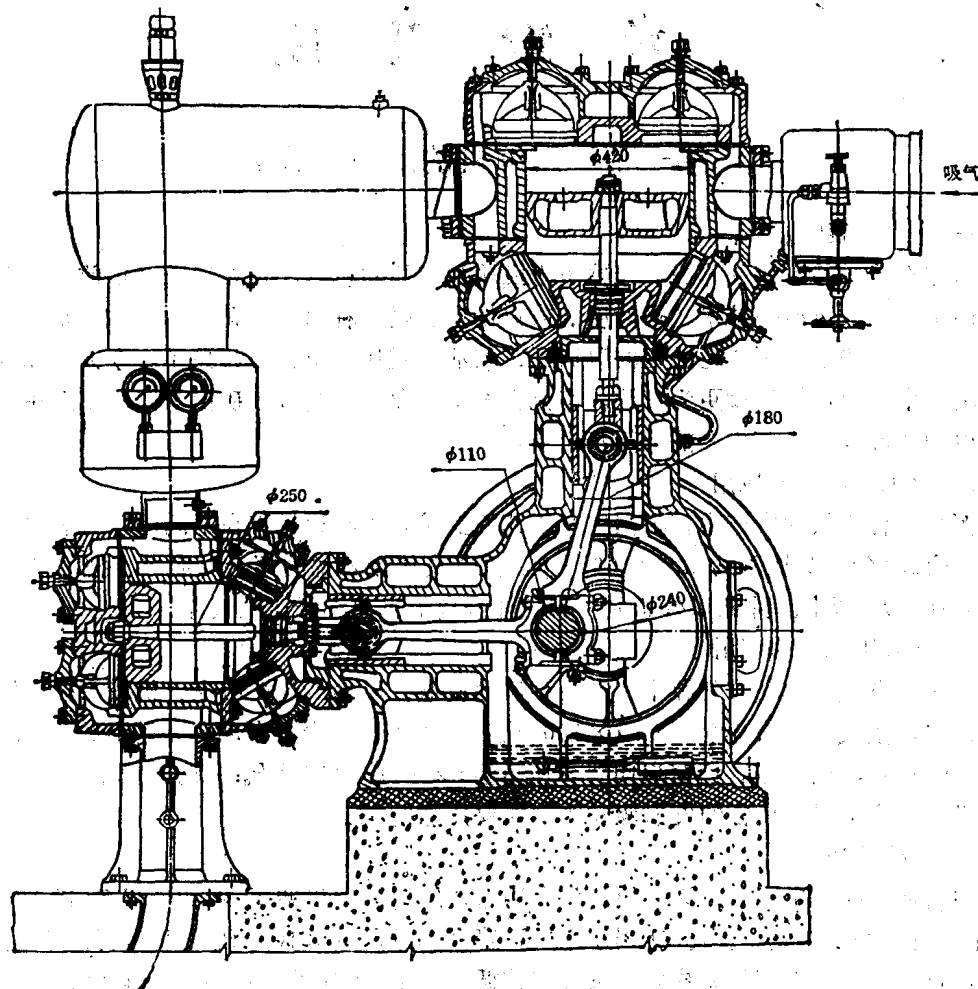


图 1-1 L 型空气压缩机

膜片式压缩机也属容积式压缩机这一类，它主要依靠弹性膜片来实现压缩气体的。

(2) 回转式压缩机

它主要依靠机内转子回转时产生容积变化而实现气体的压缩。按其结构形式的不同，又可分为滑片式和螺杆式两种。滑片式压缩机，其机内转子偏心地装在机壳内，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。螺杆式压缩机，在内腔成“8”形的气缸内设有两个转子——阳螺杆与阴螺杆，由同步齿轮带动。工作时依靠螺杆表面的凹槽与气缸内腔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。这类压缩机常作动力用的空气压缩机。

2. 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，它主要是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，使气体的动能转换成所需的压力能。根据气体在机内流向的不同，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

离心式压缩机机壳内的主轴带动若干个叶轮旋转时，气体自轴向吸入第一级叶轮，并被离心力以很高的速度甩出叶轮，进入具有扩压作用的固定导叶中，在这里将速度降低而压力提高，接着又被第二级叶轮吸入，通过第二级进一步提高压力。如此类推，一直达到额定压力，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，因此很适于大型化生产，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，也是利用转动的叶片对气流做功。当叶片旋转时，气体被轴向吸入，经过叶轮获得速度，再轴向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……。这类压缩机级中的气流路程较短，阻力损失较小，排气量也较大。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，还有一种喷射泵也可认为是速度式压缩机的一种。这类压缩机的最大优点是结构简单而紧凑，几乎不大需要维修。但它另外需要高压的工作介质，因而其使用受到一定的限制。

由于各类压缩机的工作特点不同，其性能和所适用的范围也不完全一样，根据生产工艺的要求，设计或选用压缩机时可参照图 1—2 各类压缩机适用范围。从图上可看出，活塞式压缩机多适用于高压和超高压场合，离心式压缩机多适用于大流量场合，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。

活塞式压缩机与其它类型压缩机相比其特点是：

1. 压力范围最广，从低压到高压都适用；

2. 效率高，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；

3. 适应性强，排气量可在较大的范围内变化，且气体密度对压缩机性能的影响也不如离心式那样敏感。故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。

但也有其缺点：

1. 外形尺寸及重量大，易损件较多；

2. 排气不连续，气流有脉动，且压缩的气体带油污。一般适用于中、小流量压力较高的场合。

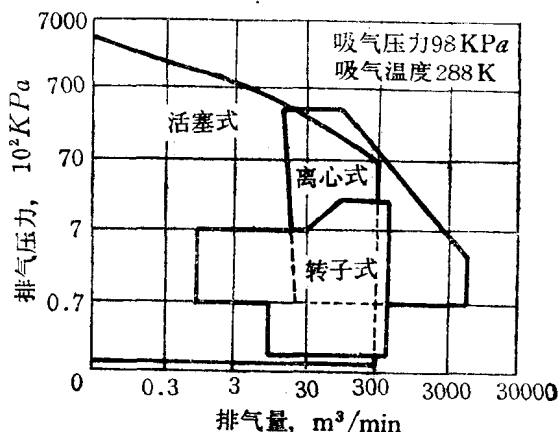


图 1—2 各类压缩机适用范围

第二节 活塞式压缩机的结构种类及型号编制

一、基本结构

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。包括三大部分:一为工作机构(气缸、活塞、气阀等)与机身。另一为运动机构(曲轴、连杆、十字头、轴承、传动部件等)。第三是辅助设备——润滑系统、冷却系统、调节系统。下面结合图1—1的L型空气压缩机总图简要说明如下:

工作机构是实现压缩机的主要部件。气缸呈圆筒形,两端设有若干吸气阀与排气阀。活塞由曲轴连杆机构带动在气缸中作往复运动。本压缩机有两个气缸,通常垂直列为一级缸,水平列为二级缸。空气从一级缸被吸入经活塞压缩到约 $2 \times 100kP_a$ (表),经中间冷却器降温,又被吸入二级缸,再经压缩升压到 $8 \times 100kP_a$ (表),排出到输气管路中供应用。

运动机构是曲柄连杆机构,将曲轴的旋转运动变为十字头的往复运动。在本压缩机中电机驱动皮带轮带动曲轴旋转。曲轴的曲拐上装有两个连杆,一在垂直列,另一在水平列。这两连杆的另一端分别与两个只能在滑道内作往复运动的十字头联接。这样,旋转的曲轴使连杆摆动,传到十字头作往复运动,而十字头再通过活塞杆使活塞在气缸内作往复运动。

机身上支承和安装着整个运动机构与工作机构,又兼作润滑油箱用。曲轴用轴承支承在机身上,机身上两个滑道又支托着十字头,两个气缸分别固定在L型机身的两臂上。

二、活塞式压缩机的种类及其型号编制

1. 种类 活塞式压缩机种类繁多,根据其性能、结构特点,可按如下几方面分类。

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 $V_d \leq 1m^3/min$ $1m^3/min < V_d \leq 10m^3/min$ $10m^3/min < V_d \leq 100m^3/min$ $V_d > 100m^3/min$
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	$200kP_a < P_d \leq 1000kP_a$ $1000kP_a < P_d \leq 10000kP_a$ $10000kP_a < P_d \leq 100000kP_a$ $P_d > 100000kP_a$
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—9,属对置式的一种特例) 气缸中心线互成一定角度(参看图1—9)
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)

此外还可以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。

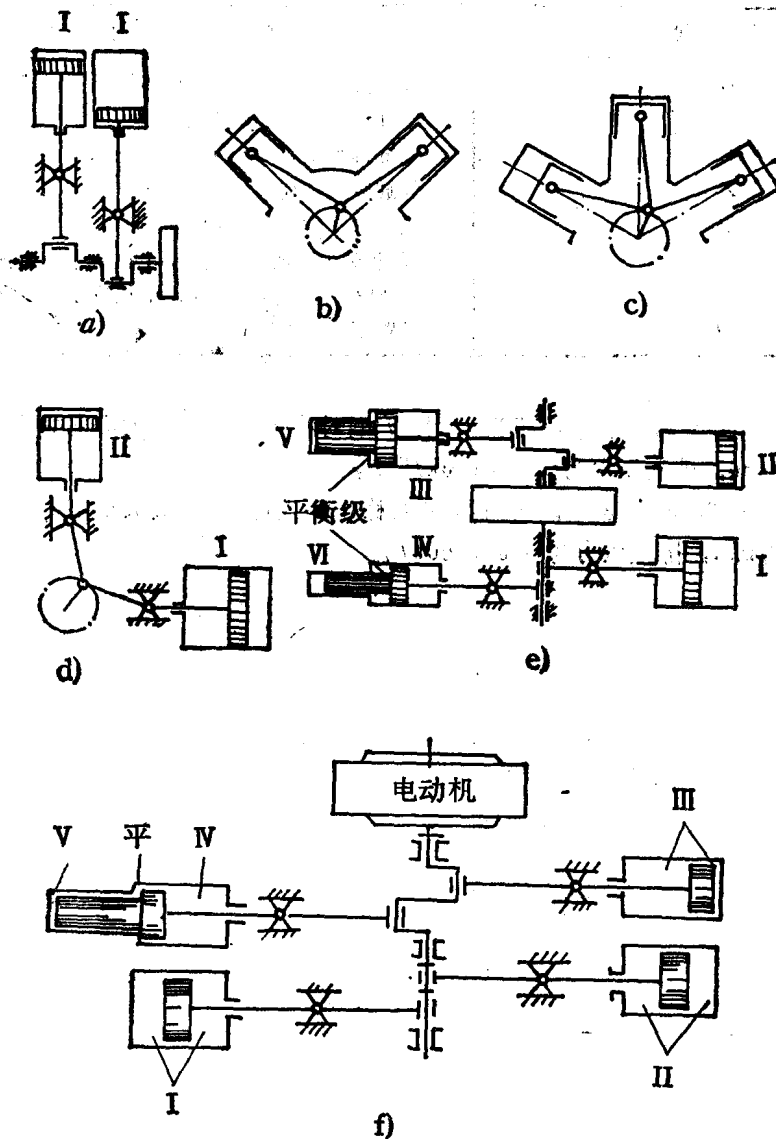
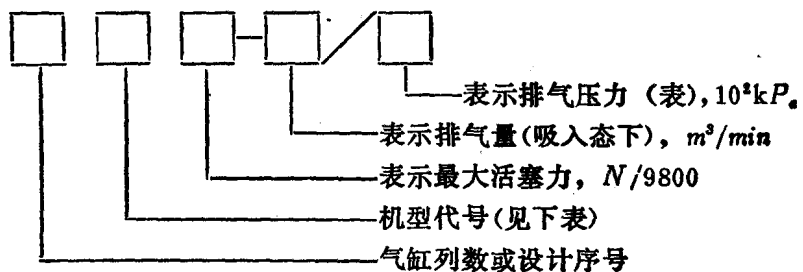


图 1-3 不同结构型式压缩机简图

a) 立式, 单级 b) V 型 c) W 型 d) L 型, 双级 e) 卧式 H 型, 多级 f) 卧式 M 型, 多级

2. 型号编制 活塞式压缩机的型号标注如下:



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

例如, 4*M*12—45/210, 表示该机为 4 列, *M* 型对称平衡式, 最大活塞力为 $12 \times 9800N$, 排气量为 $45m^3/min$, 排气压力为 $210 \times 100kPa$ 。(表)。

又如, *H*22—165/320, 表示该机为 *H* 型对称平衡式(四列), 最大活塞力为 $22 \times 9800N$, 排气量为 $165m^3/min$, 排气压力为 $320 \times 100kPa$ 。

第二章 活塞式压缩机热力学基础

第一节 气体的热力性质

一、理想气体的状态参数

压缩机的压缩对象是气体。在压缩机运转时,气缸内气体的热力状态总是周期性地不断发生变化。因此,要想分析压缩机的工作过程和原理,首先应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。

我们知道,固体有一定的外形,液体形状为容器所限制,而气体则无一定的形状也不能保持一定的体积。我们可以用一个瓶子装半瓶水,但要只装半瓶空气是办不到的。所以对气体,我们就需要通过能说明气体状态的物理量——状态参数来描述它。最常用的状态参数有:

1. 压力

气体的压力是大量气体分子在无规则运动中对容器壁不断碰撞的结果。它以气体在单位面积 F 的容器壁上所作用的力 f 来量度,即压力 $p = \frac{f}{F}$ 。压力处处垂直于容器壁面。

工程上所用的压力单位为 kgf/cm^2 ,称之为工程大气压。此外也可用 kgf/m^2 ,米水柱 (mH_2O),毫米汞柱 (mmHg) 来表示。国际压力单位是牛顿/米² (N/m^2) = 1帕斯卡 (P_0)。

在物理上以 760mmHg 作为一个大气压,称为物理大气压。1物理大气压 = 760mmHg = $10.33\text{mH}_2\text{O}$ = $1.033\text{kgf}/\text{cm}^2$ 。本书采用国际单位制。

工程上常用 U 形管或弹簧管压力计来测量压力。气体的压力可用表压、真空度和绝对压力来表示。它们之间的关系,如图 2-1 所示。

弹簧管压力计是生产上最常用的一种压力表。由于弹簧管内气体压力等于大气压力时,压力表的指针读数为 0,所以从压力表上读出的数值就是表压力。

一般工厂都没有测量大气压力的气压计,那么,怎样根据表压来计算气体的绝对压力? 经验告诉我们,凡是海拔不太高的地方都可认为大气压力值是 760mmHg

即 101.32kPa 。有时,为了计算方便,干脆把大气压力值取作 100kPa 。在压缩机计算中我们的原则是:当表压低于、等于或略高于 1 个压力时,大气压取作 101kPa 。当表压比一个压力高得多,但不到 100 个压力时,大气压力可以略去不计。总之,一要运算简便,二要将计算误差控制在允许范围之内。

例题 2-1 半水煤气经罗茨风机加压后,测得其表压为 200mmHg ,当时当地的大气压力是 750mmHg ,求半水煤气的绝对压力。

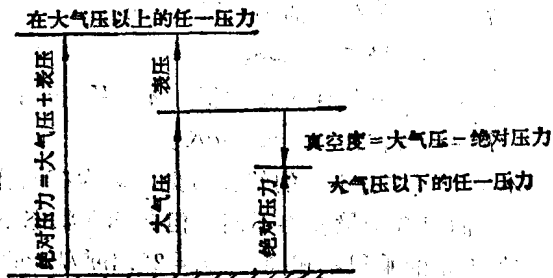


图 2-1 各种压力间的关系

解：因测量的是表压，故半水煤气的绝对压力为，

$$p = 750 \text{ mmHg} + 200 \text{ mmHg} = 950 \text{ mmHg} \\ = 950 / 735.6 = 1.29 \text{ kgf/cm}^2 = 126.42 \text{ kPa}$$

2. 比容

比容是指每单位质量气体所占有的容积，以 v 表示。

$$v = \frac{V}{m}, \text{ m}^3/\text{kg}$$

比容的倒数，即单位容积的气体所具有的质量叫密度 ρ 。

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V}, \text{ kg/m}^3$$

3. 温度

温度表示物体的冷热程度。在热力学中采用绝对温标 K 为单位。

以上三个状态参数——绝对压力 p 、绝对温度 T 和比容 v 就是气体状态的三个基本参数，用它可以说说明气体是处于什么状态。

二、理想气体的状态方程

所谓理想气体是指气体分子之间的作用力和分子本身所占有的体积均不考虑的气体。实际上，自然界中并不存在真正的理想气体。不过对于那些不易被液化的气体，如空气、氧、氮、氢气以及由这些气体组成的混合气体，在一般中、低压力下（通常在 10000 kPa 以下），可当作理想气体来看待。而对那些易被液化的气体，如 CO_2 、 NH_3 、丙烷等，只有在低压高温时才可近似看作为理想气体。理想气体状态参数在数量上的关系，可由理想气体状态方程式来描述。

对于 1 kg 气体而言

$$pv = RT \quad (2-1)$$

对于 $m \text{ kg}$ 的气体，可写成

$$pV = mRT \quad (2-2)$$

式中 p ——理想气体的绝对压力， kPa (kgf/cm^2)，

v ——理想气体的比容， m^3/kg ，

T ——理想气体的绝对温度， K ，

m ——气量质量， kg ，

V —— $m \text{ kg}$ 气体的总体积， m^3 ， $V = mv$ ，

R ——气体常数， kJ/kgK 。

不同的气体有不同的气体常数，因为在同样的压力与温度条件下，不同的气体有不同的比容 v ，而且分子量 μ 亦不同。但在标准状态下（1 物理大气压、 0°C ），各种气体的分子量 μ 与其比容 v_0 的乘积都相同， $\mu v_0 = 22.4 \text{ m}^3/\text{kmol}^*$ 。因此，对任何一种气体，可按式 2-1 改写为：

$$R = \frac{pv}{T} = \frac{p_0 v_0}{T_0} = \frac{p_0 \mu v_0}{\mu T_0} = \frac{101.32 \text{ kPa} \times 22.4 \text{ m}^3/\text{kmol}}{\mu \text{ kg/kmol} \times 273 \text{ K}} \\ = \frac{8.314}{\mu} \text{ kJ/kgK} \quad (2-3)$$

式 (2-3) 对任何理想气体在任何状态下均适用。这样，如知某气体的分子量 μ ，则可算出

* kmol ——千摩尔。式中下角标“0”表示标准状态。