



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

过程机械

下 册

(过程机器)

刘志军 李志义 喻健良 编著



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

过 程 机 械

下 册

(过程机器)

刘志军 李志义 喻健良 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是将原化工机械与设备专业的化工容器、化工机器和化工设备三门专业课,按照调整后的过程装备与控制工程专业的需要进行整合后编写的一本专业教材,分上、下两册。上册为过程容器及设备,主要介绍压力容器常规设计、压力容器分析设计、高压容器设计、球形储罐设计,以及塔、搅拌反应器和换热器等一些典型设备的结构、选型及设计要点等;下册为过程机器,主要介绍压缩机、风机、泵、制冷机、分离机等一些典型过程机器的原理、特性、选型及操作维护等。

本书尽量避免窄、专、深、偏,顾及专业知识的系统化和全面化,注重专业基本方法与技能。按层次对过程设备区别对待:对标准化的通用设备,重点介绍选型;对非标准定型设备,重点介绍结构及设计要点;对非标准非定型设备,重点介绍设计方法。对所涉及的力学问题,不强调推导过程,重视其结果及应用。

本书既适宜作为将过程容器、过程设备及过程机器三方面内容整合为一门专业课的教材成套选用,也适宜作为单独开设少学时的过程容器及设备 and 过程机器两门专业课的教材分册选用。本书还适用于化工类专业作为教材或教学参考书选用,也适用于本专业及相关专业领域的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

过程机械. 下册/刘志军,李志义,喻健良编著. —北京:化学工业出版社,2007.12
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-122-01602-7

I. 过… II. ①刘…②李…③喻… III. 化工过程-
化工机械-高等学校-教材 IV. TQ051

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 189460 号

责任编辑:程树珍 金玉连
责任校对:李 林

装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 12 字数 312 千字 2008 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 22.00 元

版权所有 违者必究

前 言

过程工业是指以改变流程性材料（如气体、液体和粉粒体等）的物理、化学性能为主要目标的加工业，它涵盖诸如化学、化工、石油化工、炼油、制药、食品、冶金等诸多工业门类和行业部门。过程工业通过一系列有机结合的工艺过程得以实现。这些工艺过程基本上可以分为物理过程和化学过程两大类，典型的有传质过程、传热过程、流动过程、反应过程、热力过程和机械过程等。

过程装备是实现过程工业生产的硬件设施。广义地讲，过程装备包括了过程装置（或称工艺装置）和辅助设施（如动力及其它公用工程设施等），但狭义上将其与过程装置同称。过程装置是由过程机械（亦称单元设备）和成套技术两部分组成的设备系统，前者是该系统的“硬件”，后者是其“软件”。过程机械可分为过程设备（或称静设备）和过程机器（或称动设备）两大类。在表述上，有时将过程设备（广义地）与过程机械同称，这时它不仅包含了静设备，还包含了动设备。

过程工业的工艺过程是在各种各样的过程机械中实现的。过程机械的种类繁多，例如：进行传质过程的传质设备有蒸馏塔、吸收塔、解吸塔、萃取塔、干燥器、结晶器、膜分离器等；进行传热过程的传热设备有换热器、蒸发器、工业炉等；进行流动过程的流动设备有泵、压缩机、离心机、风机、过滤机、旋风分离器、沉淀槽、管道、阀门等；进行反应过程的反应设备有固定床反应器、流化床反应器、滴流床反应器、搅拌反应器、生化反应器、合成塔、裂解炉、反应釜等；进行热力过程的热力设备有冰机、冷冻机、锅炉、蒸汽机等；进行机械过程的机械设备有料仓、破碎机、造粒机、混料仓、分级机、流化床、皮带输送机等。在许多情况下，一台单元设备中同时进行着多种工艺过程。

《过程机械》是为适应“过程装备与控制工程”专业改造和教学改革而编写的。1998年，教育部对高等学校本科专业进行了调整，将原“化工机械与设备”（简称“化工机械”）专业调整为“过程装备与控制工程”，从而丰富了专业内涵，拓宽了专业范围与应用领域。因此，进行专业改造以适应专业调整，便成为设置有该专业的高等学校的当务之急。在教育部过程装备与控制工程专业教学指导分委员会的指导下，各相关高校针对调整后专业的培养目标、知识结构、课程体系及教学内容等，进行了积极的探索与实践。许多高校在专业改造和教学改革的实践中，为调整后的“过程装备与控制工程”专业逐步构筑了三大知识平台：以“工程力学”、“热力学”、“流体力学”和“粉体力学”为主体的理论基础平台；以“过程”、“机械”和“控制”为主线的技术基础平台；以“单元设备”、“成套技术”和“控制技术”为核心的专业知识平台。对“单元设备”进行了整合、重组与扩充，将原来的“化工容器”、“化工机器”和“化工设备”三门课整合为一门“过程机械”。这本教材就是为了适应这种课程整合，在多年教学实践的基础上编写而成的。

在编写本教材时，我们力图避免“窄”、“专”、“深”、“偏”，顾及专业知识的系统化和全面化，注重专业基本方法与技能，不搞“解剖麻雀”。将单元设备按层次分类，然后区别对待。对标准化通用设备，重点介绍选型；对非标准化定型设备，重点介绍结构及设计要点；对非标准化非定型设备，重点介绍设计方法。当涉及力学问题时，尽量采用实用的简化分析方法。对

于一些复杂的力学问题，一般只介绍求解思路，不作详细推导，重点放在结果的讨论及应用上。同时给出相应的参考文献，供进一步深入和扩充。这样，使得本教材既可适用于力学基础较扎实者使用，给他们留有扩展和深化知识的空间；也可适用于力学基础较弱者（如化工类本科生）使用，使他们能顺利逾越力学障碍。

基于上述编写思想，本教材不仅扩充了内容，而且压缩了学时。本教材分上、下两册：上册内容为过程容器及设备，下册内容为过程机器。这样既便于将“过程容器”、“过程设备”和“过程机器”三方面内容整合成一门“过程机械”课程的高校成套选用，也有利于单独开设少学时“过程容器及设备”和/或“过程机器”课程的高校分册选用。

本教材上册第1~4章由李志义编写，第5章由夏远景编写，第6章由刘学武编写，第7章由喻健良编写，第8章由喻健良、李岳编写，第9章由伊军编写；下册第10~13章由刘志军编写，第14章由史启才编写，第15章由刘凤霞编写。全书由李志义主编。本教材每章后附有思考题，引导学生巩固和深化教学内容。其中一些思考题是开放性和探索性的，引导学生在掌握本教材基本内容的同时，进行更深、更广泛的探讨。

许多本专业的优秀教材，如余国琮先生主编的《化工容器及设备》、王志文教授主编的《化工容器设计》、郑津洋教授主编的《过程设备设计》，高慎琴教授主编的《化工机器》、姜培正教授主编的《流体机械》等，对本教材的编写启发颇深，本教材学习和吸收了其中许多精华。在此，对这些作者表示诚挚的谢意。教育部过程装备与控制工程专业教学指导分委员会、大连理工大学教务处和大连理工大学化工机械系对本教材的编写和出版给予了大力支持，在此表示感谢。

由于水平有限，认识不深，本教材会有许多不尽如人意之处，请各位专家和学者不吝赐教。

编著者

2007年11月

于大连理工大学

目 录

(上 册)

1 压力容器设计概述	1	思考题	35
1.1 压力容器及其分类	1	3 压力容器常规设计	36
1.1.1 压力容器及其构成	1	3.1 圆筒形容器筒体的强度设计	36
1.1.2 压力容器的分类	1	3.2 压力容器封头的强度设计	38
1.2 压力容器的设计要求	2	3.2.1 半球形封头	38
1.2.1 强度要求	2	3.2.2 椭圆形封头	39
1.2.2 刚度要求	3	3.2.3 碟形封头	40
1.2.3 使用寿命要求	3	3.2.4 球冠形封头	41
1.2.4 结构要求	3	3.2.5 锥形封头	42
1.3 压力容器材料及选择	3	3.2.6 平盖封头	43
1.3.1 压力容器用钢	3	3.3 法兰连接及密封设计	45
1.3.2 对压力容器用钢的要求	4	3.3.1 法兰密封及失效	45
1.3.3 压力容器用钢的选择	5	3.3.2 法兰密封设计	48
1.4 压力容器规范简介	5	3.3.3 法兰强度设计	56
1.4.1 国外压力容器规范	6	3.4 开孔接管及补强设计	58
1.4.2 中国压力容器规范	6	3.4.1 补强结构与设计规则	59
思考题	8	3.4.2 等面积补强设计	60
2 压力容器应力分析	10	3.5 容器支座的结构与选型	62
2.1 中低压容器应力分析	10	3.5.1 悬挂式支座	63
2.1.1 压力容器的薄膜应力	10	3.5.2 支承式支座	64
2.1.2 压力容器的边缘应力	15	3.5.3 鞍式支座	64
2.2 圆筒形高压容器应力分析	17	3.6 外压容器稳定性设计	66
2.2.1 弹性应力分析	18	3.6.1 圆环的稳定性分析	66
2.2.2 弹塑性应力分析	20	3.6.2 圆柱形筒体的稳定性分析	67
2.2.3 温差应力分析	22	3.6.3 外压圆筒的设计计算	69
2.2.4 机械应力与热应力的综合应力	23	3.6.4 外压封头的设计计算	73
2.3 圆形平盖封头应力分析	24	3.6.5 加强圈设计	74
2.3.1 定解方程及求解	24	3.7 设计参数及压力试验	77
2.3.2 变形及应力分布特点	28	3.7.1 设计参数	77
2.4 压力容器局部应力分析	29	3.7.2 压力试验	80
2.4.1 局部应力及分析方法	29	思考题	81
2.4.2 平板开小孔的应力集中	29	4 压力容器分析设计	83
2.4.3 压力容器开小孔的应力集中	32	4.1 分析设计概述	83
2.4.4 压力容器开孔接管的应力集中	33	4.1.1 常规设计的局限性	83

4.1.2 分析设计的基本思想	84	6.2 球罐壳体设计	127
4.1.3 分析设计与常规设计规范比较	84	6.2.1 橘瓣式球壳的设计	128
4.2 应力特性	85	6.2.2 足球瓣式和混合式球壳设计	130
4.2.1 中低压容器	86	6.3 球罐支座设计	131
4.2.2 高压容器	86	6.3.1 赤道正切柱式支座设计	131
4.2.3 平盖封头	88	6.3.2 其它形式的支座结构	134
4.2.4 壳体不连续区	88	6.4 人孔、接管及附件设计	137
4.2.5 容器支座区	90	6.4.1 人孔结构	137
4.2.6 容器接管区	90	6.4.2 接管结构	137
4.2.7 容器热应力	91	6.4.3 球罐附件	138
4.3 应力分类	92	6.5 球罐的抗震结构设计	140
4.3.1 一次应力	92	6.5.1 球罐抗震结构设计的一般要求	140
4.3.2 二次应力	93	6.5.2 球罐抗震设计的方法与措施	140
4.3.3 峰值应力	93	思考题	142
4.4 应力评定	95	7 塔设备	143
4.4.1 应力强度	95	7.1 概述	143
4.4.2 应力强度设计限制	98	7.1.1 塔设备的作用和类型	143
4.4.3 极限载荷设计概念	100	7.1.2 塔型比较及选择	143
4.4.4 结构安定性概念	103	7.1.3 对塔设备的要求	143
4.4.5 疲劳分析设计准则	104	7.2 板式塔	144
思考题	106	7.2.1 设计内容	144
5 高压容器设计	107	7.2.2 总体结构及分类	144
5.1 高压容器设计概述	107	7.2.3 塔盘结构	145
5.1.1 高压容器的结构特点	107	7.3 填料塔	156
5.1.2 高压容器的材料特点	108	7.3.1 设计内容	156
5.1.3 高压容器筒体的结构型式	108	7.3.2 总体结构	157
5.2 高压圆筒的强度设计	113	7.3.3 填料类型及选用	157
5.2.1 高压圆筒强度设计准则	113	7.3.4 液体的分布装置和液体再分布 装置	161
5.2.2 单层高压圆筒的强度计算	115	7.3.5 填料的支承装置	165
5.2.3 多层高压圆筒的强度计算	116	7.3.6 填料压板和床层限制板	166
5.3 高压容器的密封结构	116	7.4 辅助装置及附件	167
5.3.1 强制式密封	117	7.4.1 裙座	167
5.3.2 自紧式密封	118	7.4.2 除沫器	168
5.3.3 高压管道密封	121	7.4.3 接管	169
5.4 高压容器的自增强技术	121	7.4.4 吊柱	172
5.4.1 自增强技术原理	121	7.5 塔设备的机械设计	174
5.4.2 自增强处理压力	122	7.5.1 塔体厚度的计算	174
5.4.3 自增强处理应力	122	7.5.2 塔体承受的各种载荷的计算	174
5.4.4 自增强处理半径	123	7.5.3 塔体稳定校核	181
5.4.5 自增强处理方法	124	7.5.4 塔体拉应力校核	182
思考题	124	7.5.5 水压试验时应力校核	183
6 球形储罐设计	126	7.5.6 裙座设计	184
6.1 概述	126	7.6 塔体与裙座的机械设计举例	190
6.1.1 球罐的特点	126	7.6.1 选择材料	190
6.1.2 球罐分类	126	7.6.2 按计算压力计算筒体和封头的	
6.1.3 球罐的设计内容	127		

壁厚	191
7.6.3 塔的质量载荷计算	191
7.6.4 塔的自振周期计算	193
7.6.5 地震载荷计算	193
7.6.6 风载荷和偏心弯矩计算	193
7.6.7 各种载荷引起的轴向应力	195
7.6.8 筒体和裙座危险截面的强度和 稳定性校核	195
7.6.9 筒体和裙座水压试验应力校核	196
7.6.10 基础环设计	197
7.6.11 地脚螺栓设计	198
思考题	198
8 换热器	199
8.1 概述	199
8.1.1 换热器的应用	199
8.1.2 换热器的类型	199
8.1.3 换热器的选型	200
8.2 管壳式换热器	201
8.2.1 基本类型	201
8.2.2 管壳式换热器的总体设计	203
8.2.3 管壳式换热器的主要部件与结构 设计	204
8.3 膨胀节设计	218
8.4 热管及热管换热器	219
8.4.1 热管简介	219
8.4.2 热管换热器	221
思考题	223

9 搅拌反应设备	224
9.1 反应器类型	224
9.2 典型搅拌反应器	225
9.2.1 总体结构	225
9.2.2 设计内容及步骤	226
9.3 釜体与传热装置	227
9.3.1 釜体设计	227
9.3.2 传热装置设计	228
9.4 搅拌器及附件的设计	234
9.4.1 搅拌器的功能	234
9.4.2 典型搅拌器	236
9.4.3 搅拌附件	239
9.4.4 搅拌器选型	240
9.4.5 搅拌器转速与搅拌功率	242
9.4.6 搅拌器的强度计算	245
9.4.7 搅拌轴设计	248
9.5 传动装置	251
9.5.1 电动机的基本特性及选用	251
9.5.2 减速机	252
9.5.3 联轴器	256
9.6 轴封装置	257
9.6.1 填料密封	257
9.6.2 机械密封	260
9.6.3 机械密封和填料密封的比较	262
思考题	263
参考文献	264

(下 册)

10 压缩机	1
10.1 压缩机的类型及应用	1
10.1.1 压缩机的分类及比较	1
10.1.2 压缩机的应用	3
10.2 往复活塞式压缩机	4
10.2.1 往复活塞式压缩机基本原理	4
10.2.2 往复活塞式压缩机的调节与 控制	16
10.2.3 往复活塞式压缩机的典型结构及 零部件	20
10.2.4 往复活塞式压缩机的选型	25
10.3 离心式压缩机	29
10.3.1 离心式压缩机基本原理	29
10.3.2 离心式压缩机的工作特性及 调节	37
10.3.3 相似理论在离心式压缩机中的	

应用	39
10.3.4 离心式压缩机主要零部件	41
10.3.5 离心式压缩机的选型	42
10.4 其它压缩机	45
10.4.1 螺杆式压缩机	45
10.4.2 单螺杆式压缩机	46
10.4.3 滚动活塞式压缩机	47
10.4.4 滑片式压缩机	47
10.4.5 液环式压缩机	47
10.4.6 涡旋式压缩机	48
10.4.7 轴流式压缩机	48
10.4.8 轴流离心混合式压缩机	49
思考题	49
讨论题	51
11 风机	53
11.1 风机的类型及性能参数	53

11.1.1 风机的类型	53	12.6 其它形式的低温制冷机	104
11.1.2 风机的性能参数	53	12.6.1 斯特林制冷机	105
11.2 离心式风机	56	12.6.2 维勒米尔制冷机	105
11.2.1 离心式风机的工作原理	56	12.6.3 磁性制冷机	106
11.2.2 离心式风机的工作特性及调节	57	12.6.4 吸附制冷机	106
11.2.3 相似理论在离心式风机中的 应用	62	12.6.5 气波制冷机	106
11.2.4 离心式风机的主要零部件	62	思考题	107
11.2.5 离心式风机的选型	64	13 泵	108
11.3 轴流式风机	66	13.1 泵的类型及应用	108
11.3.1 轴流式风机的结构及工作原理	66	13.1.1 泵的类型	108
11.3.2 轴流式风机的特点及性能曲线	67	13.1.2 泵的应用	109
11.3.3 轴流式风机的调节	68	13.2 离心泵	109
11.3.4 轴流式风机的选型	69	13.2.1 离心泵的基本结构与工作原理	109
11.4 其它型式的风机	69	13.2.2 离心泵的操作与调节	112
11.4.1 罗茨鼓风机与叶氏鼓风机	69	13.2.3 相似理论在离心泵中的应用	119
11.4.2 横流式通风机	71	13.2.4 离心泵的主要零部件	122
11.4.3 筒形离心式风机	71	13.2.5 离心泵的选型	123
思考题	72	13.3 其它形式叶片式泵	130
12 制冷机	73	13.3.1 轴流泵和混流泵	130
12.1 概述	73	13.3.2 旋涡泵	131
12.1.1 制冷机的基本原理及分类	73	13.4 容积式泵	132
12.1.2 制冷剂和载冷剂	73	13.4.1 概述	132
12.1.3 润滑油	75	13.4.2 往复泵	134
12.2 活塞式制冷机	75	13.4.3 转子泵	135
12.2.1 活塞式制冷机的压缩循环	75	13.5 计量泵	137
12.2.2 活塞式制冷机制冷循环的工作 参数	77	13.6 真空泵	138
12.2.3 活塞式制冷压缩机的选型指南	78	13.6.1 真空泵的性能指标	138
12.2.4 活塞式制冷机的制冷热交换 设备	82	13.6.2 各类真空泵的工作范围及特征	139
12.2.5 活塞式制冷机的辅机系统	83	13.6.3 真空泵的选型	139
12.2.6 活塞式制冷机组	88	思考题	140
12.3 螺杆式制冷机	89	14 离心机	141
12.3.1 螺杆式制冷压缩机的性能参数及 调节	89	14.1 离心分离的基本知识	141
12.3.2 螺杆式制冷机的形式及参数	91	14.1.1 离心力场的基本特性	141
12.3.3 螺杆式制冷机的选型指南	93	14.1.2 离心机的分类	145
12.4 离心式制冷机	95	14.1.3 原料液的特性	146
12.4.1 离心式制冷机的特点及应用	95	14.1.4 原料液的预处理	147
12.4.2 离心式制冷机的基本组成和制冷 循环	95	14.2 过滤式离心机	148
12.4.3 离心式制冷机的选型指南	97	14.2.1 各种过滤式离心机的特点及 应用	148
12.5 吸收式制冷机	100	14.2.2 过滤式离心机的生产能力	151
12.5.1 溴化锂吸收式制冷机	100	14.3 沉降式离心机	151
12.5.2 氨-水吸收式制冷机	104	14.3.1 各种沉降式离心机的特点及 应用	151
		14.3.2 沉降式离心机的生产能力	152
		14.4 分离机	153
		14.4.1 各种分离机的特点及应用	153

14.4.2 分离机的生产能力	157	15.1 高速转子轴的临界转速	166
14.5 离心机功率的确定	157	15.1.1 转轴的临界转速	166
14.6 离心机的主要零部件	157	15.1.2 临界转速的计算	166
14.6.1 转鼓	157	15.2 机器的振动及隔振	167
14.6.2 过滤式离心机滤网	158	15.2.1 隔振的基本原理	167
14.6.3 主轴及支承	158	15.2.2 隔振器及其布置	168
14.7 离心机的选型	158	15.3 高速转盘和转鼓的强度	170
14.7.1 离心机型号的编制	158	15.3.1 高速转盘的强度	170
14.7.2 选型原则	158	15.3.2 高速转鼓的强度	171
14.7.3 选型指南	160	15.4 机器的故障诊断	172
14.8 其它形式的分离机械	164	15.5 流体密封技术	174
14.8.1 旋液分离器	164	15.5.1 往复运动式轴密封	174
14.8.2 重力过滤机	164	15.5.2 旋转式轴密封	175
14.8.3 加压过滤机	164	15.5.3 干气密封	178
14.8.4 真空过滤机	165	15.5.4 浮环密封装置	179
思考题	165	思考题	180
15 过程机器的安全可靠性的	166	参考文献	181

10 压缩机

10.1 压缩机的类型及应用

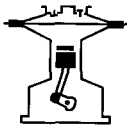
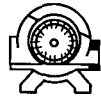
10.1.1 压缩机的分类及比较

压缩机是一种能提高气体压力并能连续输送气体的机器，它把机械能转变为气体的能量。压缩机的排气压力一般大于 0.3MPa，当排气压力小于 0.3MPa 时，一般称为风机。

(1) 压缩机的分类

① 按工作原理分类 压缩机的种类很多，按其工作原理大致可分为容积式压缩机和速度式压缩机两大类。容积式压缩机通过活塞、柱塞或各种形状的转子压缩密闭空腔内气体的体积来提高气体的压力，它又可分为往复运动式和回转运动式两种类型。速度式压缩机是利用高速旋转叶片的动力学作用给气体提供能量，而后，部分气体动能再转变成压力能，它又可分为离心式、轴流式和混流式三种类型。压缩机的分类及结构形式见表 10.1。

表 10.1 压缩机按工作原理分类表

压缩机类型			结构特点	结构简图
压缩机	容积式压缩机	往复运动式	活塞式压缩机 具有曲柄连杆机构驱动，活塞在圆筒形气缸内作往复运动。	
			膜式压缩机 具有穹形型面的盖板和弹性膜片组成膜腔，膜片上下挠曲变形改变膜腔容积。	
		回转运动式	滑片式压缩机 具有圆形工作腔和偏心转子，转子或缸体上开设若干个槽并装有自由滑动的叶片。	
			螺杆式压缩机 具有∞字型气缸和一对相互啮合的螺旋形转子，转子齿间容积随螺杆的转动而改变。	
			转子式压缩机 气缸和转子其中之一的型线为摆线，另一型线为摆线的共扼包络线，转子在气缸内作行星运动改变气缸工作容积。	
	速度式压缩机	径流式	离心式压缩机 具有高速回转的叶轮以及扩压器、弯道、回流器等固定元件	
		轴流式	轴流式压缩机 具有高速回转的动叶栅以及起导流和扩压作用的静叶栅	
		混流式	混流式压缩机 前面几级采用大流量的轴流级，后面几级采用较小流量的离心级。	

② 按结构分类 在工程上,按结构对压缩机进行分类也是经常使用的,其主要分类如下。

- i. 按照压缩机级数分:单级、两级、三级、……、多级。
- ii. 按照压缩方法分:单作用(单动)和双作用(复动)。
- iii. 按照气缸数量分:单缸、双缸、……、多缸。
- iv. 按气缸轴线布置的相互关系分:卧式、立式、L型、V型、W型、星型和对称平衡型。
- v. 按气缸壁的冷却方式分:空冷式和水冷式。
- vi. 按压缩机的安装方式分:固定式、半移动式、移动式。
- vii. 按排气量大小分:微型、小型、中型和大型。
- viii. 按气缸部件的润滑方式分:有润滑油、无润滑油和非接触润滑。

(2) 各类压缩机的特点及比较

工业上几种常用的压缩机的基本形式和优缺点介绍如下。

① 往复式活塞式压缩机 是依靠气缸内作往复运动的活塞来压缩气体的,气缸上设有进气阀和排气阀,用来控制气体的进入或排出,根据实际需要,往复式活塞式压缩机可以做成逐级压缩的形式,即为多级压缩。工业上应用的多级压缩机级数可达6~7级,级数越多,排气压力越高。

往复式活塞式压缩机的主要优缺点如下。

- i. 适用压力范围较广,其排气压力从低压到超高压均可,在压力较高的场合下显示出其它类型压缩机不可比拟的优越性。目前工业生产中,其排气压力已经达到350MPa,实验室中可达到1000MPa的水平。
- ii. 绝热效率较高,大型往复式活塞式压缩机的绝热效率可达80%以上。
- iii. 适应性较强,往复式活塞式压缩机在小气量下工作,也能保持较高的效率。而且排气压力对排气量的影响较小,气体的密度对压缩机的性能影响也不大,因此,往复式活塞式压缩机的通用性非常好。
- iv. 机器结构较复杂,易损件较多。此外,进气和排气是脉动不连续的,容易引起气流脉动及管路振动。

② 螺杆式压缩机 也是容积式压缩机的一种,通常所说的螺杆式压缩机是指双螺杆压缩机,工业上也有单螺杆压缩机,两种压缩机均属于回转容积式压缩机。

双螺杆式压缩机是在一个“∞”形的气缸内配置一对阳、阴螺杆构成的,阳螺杆与原机主轴相连,阳螺杆通过一对同步齿轮带动阴螺杆按一定的传动比转动。

单螺杆压缩机是由一个螺杆与几个星轮相啮合构成的。单螺杆的螺槽、气缸内壁和星轮的齿面构成了封闭的容积单元。原动机的轴带动螺杆运转,螺杆带动星轮旋转。

螺杆式压缩机的主要优缺点如下。

- i. 结构简单,没有易损件,运转可靠。
- ii. 运动部件动力平衡好,机器转速较高,尺寸小,重量轻,占地面积少。
- iii. 进、排气周期较短,压力脉动小。
- iv. 适应性强,排气压力的变化几乎不影响排气量,在较宽的气量范围内能保持较高的效率,并能适应多种气体工质。
- v. 噪声、振动小,单螺杆压缩机的噪声一般为60~68dB(A);双螺杆压缩机的噪声一般为64~78dB(A)。
- vi. 造价较高,加工难度大。不能用于高压场合,双螺杆压缩机的排气压力一般不超过3MPa,单螺杆压缩机的排气压力一般低于5.6MPa。此外,螺杆式压缩机一般不能用于排气

量太小的场合。

③ 离心式压缩机 是透平式流体机械的一种，它利用高速回转的一组叶轮对气体做功，使气体在离心力场中压力得到提高，同时也增加了气体的动能，在后面的流道中，气体的部分动能又转化为气体的静压能，从而使气体的压力进一步得到提高。

离心式压缩机的主要优缺点如下。

i. 转速高，处理气量大，单位排气量机器的体积较小。

ii. 易损件较少，机器的运转率较高。

iii. 排气无脉动，不需要贮气罐；气体不受润滑油的污染，压缩后的气体一般不需要油气分离器。

iv. 不适用于流量太小和排气压力过高的场合，稳定工况范围较窄，虽然气量调节方便，但气量调节后机器的效率会明显下降。

v. 操作技术要求较高，运转时噪声较大。

④ 轴流式压缩机 由旋转叶片（动叶）和固定在机壳内的导向叶片（静叶）所组成。动叶对气体做功，静叶对气体进行导流和扩压，气体在叶片上的流动是轴流方向。轴流式压缩机没有涡室，气流畅通，适用于处理压力较低、流量更大的气体。目前已经被广泛采用汽轮机用压缩机。

与离心式压缩机相比，轴流式压缩机要获得同样的排气压力，叶轮的圆周速度约为离心式压缩机的 2 倍，因而，轴流式压缩机的噪声较大。此外，轴流式压缩机的稳定工况范围也受到喘振等条件的限制。

图 10.1 表明了各种形式压缩机容积流量和排气压力的应用范围，在几种形式重叠的范围内，应根据其它要求来确定压缩机的形式。

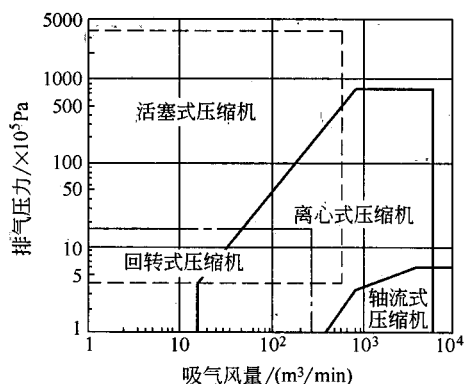


图 10.1 各种形式的压缩机的应用范围

10.1.2 压缩机的应用

压缩机作为一种重要的通用机械，在化工、石油化工、动力等各个领域均得到广泛的应用，压缩机的主要用途见表 10.2。

表 10.2 压缩机主要用途一览表^[1]

MPa

用途	气体	工作压力(表)	用途	气体	工作压力(表)
化学工业	氮、氢混合气	15, 20, 32, 60	氯乙烯	乙烯、氧	1.0
	循环气	升压 3~4		合成气	0.5
	空气	3.5, 7.0	丙烯腈	丙烯气	2.0
	氮气	2.5~3.5 7.0~8.0		空气	0.2
	氨气	1.5, 3.5	合成橡胶	丙烯气	2.0
	合成尿素	二氧化碳		生成气	1.6
	合成甲醇	氮、氢、氧 二氧化碳	合成纤维	乙炔	1.2
	制取乙烯、丙烯	裂解气		空气	0.35~1.2
		乙烯气		二氧化碳	0.4
		丙烯气	正丁醛	合成气	3
	高压聚乙烯	一次		空气(脱钴)	3
		二次	醋酸乙烯 (乙烯气相法)	乙烯、氧	0.6~0.8

续表

用 途		气 体	工作压力(表)	用 途	气 体	工作压力(表)	
气体分离	气体分离	空气	0.5~0.8,2.5, 2.2	气体输送	气态装瓶	甲烷、稀有气体	22,24
	焦炉气氢分	焦炉气	1.2			氧、氮	15
石油炼制	催化裂化	裂解气	0.95			二氧化碳	7~8
		空气	0.25~0.4			乙炔	2.1
	重整	烃	2.75			丙烷	1.6
	脱硫	氢	7,11,16			氮	1.5
	加氢精制	氢	2.6~3.6,7~9	氨	1.2~1.5		
			15,32	制 冷	空调、冷冻 冷藏	氟里昂	0.8~1.8
采油	钻井	空气	8			氨	0.8~1.4
	油田注气	二氧化碳、空气	5~13	空气动力	水压机	空气	15,35
气体输送	气态管道 输送	甲烷	7~9		风力器械	空气	0.7~1.2
		多种成分烃	1.6,2.5,4		仪表控制	空气	0.4~0.6
		城市煤气	0.3,0.5		车辆制动	空气	0.4~0.6
					喷涂、喷雾	空气	0.1~0.3
					内燃机启动	空气	3.0~3.5
			武器系统	空气	150~300		

10.2 往复式活塞式压缩机

10.2.1 往复式活塞式压缩机基本原理

10.2.1.1 结构原理及工作循环

(1) 总体组成

图 10.2 为一单作用往复式活塞压缩机的结构简图。往复式活塞压缩机主要是由气缸、驱动机构(曲柄连杆机构及活塞组件)和机身组成的。此外,压缩机还设有注油器、中间冷却系统、调节系统、滤清器、缓冲罐等辅助系统。

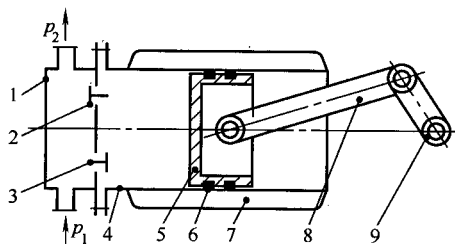


图 10.2 往复式活塞压缩机简图

1—气缸盖; 2—排气阀; 3—进气阀; 4—气缸; 5—活塞;
6—活塞环; 7—冷却套; 8—连杆; 9—曲轴

(2) 工作循环

往复式活塞式压缩机的工作过程如下(参考图 10.2): 活塞从气缸盖侧(也称“外止点”位置)开始向右运动时, 缸内的工作容积逐渐增大, 内部压力下降, 外界气体顶开进气阀进入气缸, 直到活塞运动到最右边的位置(也称“内止点”位置), 吸气过程结束, 进气阀关闭。然后, 活塞开始向左运动, 气缸内的工作容积减小, 缸内的气体被压缩, 此过程称为压缩过程。当缸内气体的压力达到并略高于排气管内气体的压力时, 排气阀打开, 缸内的气体被排出到排气管内, 直到活塞运动到最左边位置, 此过程称为排气过程。当活塞再次向右运动时排气阀关闭, 重复上述循环过程, 气缸内相继实现进气、压缩、排气等过程, 即完成了一个工作循环。

在上述循环过程中, 如果假设:

- 气缸内无余隙容积, 排气终了时气体全部排出气缸;
- 气体通过进、排气阀时无压力损失, 且进、排气压力没有波动;
- 气体压缩过程指数为定值;
- 气缸内气体在吸气、压缩和排气过程中不发生泄漏。

这样的压缩循环就称为理论压缩循环。往复式活塞式压缩机的理论循环 p - V 指示图见图

10.3。图中：4-1 为进气过程，是一条等压线；1-2 是压缩过程，是一条压缩过程指数为常数的凹曲线；2-3 是排气过程，也是一条等压线。

理论压缩循环的进气容积等于气缸的行程容积，气缸的行程容积是指气缸内活塞扫过的最大容积，即

$$V_1 = V_h = A \times s$$

单作用气缸

$$V_h = \frac{\pi}{4} D^2 s$$

双作用气缸

$$V_h = \frac{\pi}{4} (2D^2 - d^2) s$$

(10.1)

式中 V_1 ——理论循环进气容积， m^3 ；

V_h ——行程容积， m^3 ；

A ——气缸的截面积， m^2 ；

s ——活塞的行程， m ；

D ——气缸内径， m ；

d ——活塞杆直径， m 。

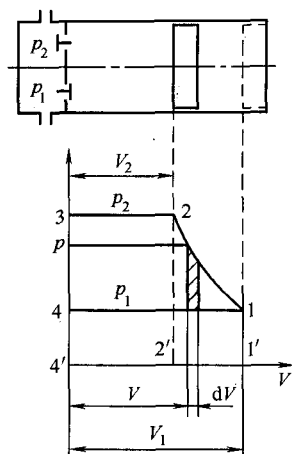


图 10.3 往复式压缩机理论循环 p - V 指示图

图 10.3 中理论压缩循环所包围的面积即代表理论循环的压缩功，外界对气体所做的压缩功也称为理论压缩循环的指示功，相对应的 p - V 图也称为示功图。理论压缩循环指示功的大小与气体的压缩过程有关，由热力学的知识可以导出各种压缩过程的理论循环指示功分别为

等温过程

$$W_i = p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$$

等熵过程

$$W_{ad} = p_1 V_1 \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

(10.2)

多变过程

$$W_{pol} = p_1 V_1 \frac{m}{m-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$

式中 W_i , W_{ad} , W_{pol} ——等温、绝热和多变过程的理论循环指示功， J ；

p_1 , p_2 ——理论压缩循环的吸气压力和排气压力， Pa ；

V_1 ——理论压缩循环的进气容积， m^3 ；

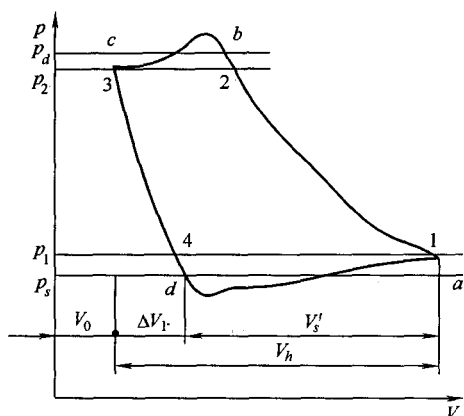
k , m ——气体的等熵过程指数和多变过程指数。

理论循环过程是一个简化的理想过程，实际循环比理论循环要复杂得多，实际循环指示图见图 10.4。实际循环与理论循环的区别如下。

i. 气缸内不可能完全消除余隙容积。余隙容积主要由气缸盖端面与活塞端面所留的间隙而形成的容积；进、排气阀通道所形成的容积；以及活塞与气缸在第一道活塞环之前形成的容积等几部分构成。排气过程终了时，余隙容积内残存少量高压气体，这部分高压气体在活塞开始返程时有一个膨胀过程，直至气缸内气体膨胀至压力略低于进气管内名义进气压力时，才开始吸气过程。

ii. 进、排气阀使气体进出阀门时产生阻力损失，从而导致气缸内的实际吸气压力低于进气管内的名义进气压力；气缸内的实际排气压力高于排气管内的名义排气压力。此外，由于气缸吸、排气过程的间断性，实际的进、排气压力会产生压力波动。

iii. 在压缩和膨胀过程中，气体的温度不断变化，气体和缸壁之间存在着不稳定的热交换过程，所以压缩过程和膨胀过程的过程指数不是定值。

图 10.4 往复式压缩机实际循环 p - V 指示图

iv. 气阀、填料函和活塞环等部位总会有气体泄漏, 泄漏无法在 p - V 指示图上直观表示, 但泄漏会影响压缩过程线和膨胀过程线的斜率大小, 并影响进气量和排气量。

比较图 10.3 和图 10.4 的不同特点, 可以明显看出理论循环和实际循环的差别。

此外, 实际气体和理想气体的差别也会影响压缩机的工作循环, 理想气体和实际气体的状态方程和过程方程分别表示为

$$\text{理想气体状态方程} \quad pV = mRT$$

$$\text{实际气体状态方程} \quad pV = ZmRT$$

$$\text{理想气体过程方程} \quad p_1 V_1^k = p_2 V_2^k$$

$$\text{实际气体过程方程}$$

$$\begin{cases} p_1 V_1^{k_{v1}} = p_2 V_2^{k_{v2}} \\ \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k_T - 1}{k_T}} \end{cases} \quad (10.3)$$

$$R = \frac{8314}{\mu}$$

式中 m ——气体的质量, kg;

Z ——压缩性系数, 可由通用压缩性系数图查取;

p ——压力, Pa;

V ——体积, m^3 ;

T ——温度, K;

k ——理想气体的等熵过程指数;

k_T ——温度等熵指数, 受温度和压力的影响相对较小, 对于双原子气体, 可以用 k 代替 k_T ;

k_V ——容积等熵指数, 受温度和压力的影响较大;

R ——气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

μ ——气体的分子量, kg/kmol 。

因此, 实际气体的容积为

$$V = V_1 \frac{Z}{Z_1} \left(\frac{p_1}{p} \right)^{\frac{1}{k_T}} \quad (10.4)$$

(3) 实际循环的进气量

实际循环的进气量是指名义进气状态下的进气量, 它比理论循环的进气量要小。实际循环的进气量可表示为

$$V_s = \lambda_V \cdot \lambda_p \cdot \lambda_T \cdot V_h \cdot n \quad (10.5)$$

式中 V_s ——实际进气量, m^3/min ;

λ_V ——容积系数;

λ_p ——压力系数;

λ_T ——温度系数;

n ——压缩机转速, r/min 。

① 容积系数 λ_V 反映了由于气缸余隙容积的存在, 使气缸行程容积被膨胀气体所占有, 从而导致吸气量减少的程度, 是表征气缸行程容积有效利用程度的系数。结合图 10.4 所示的 p - V 指示图, 容积系数可表示为

$$\lambda_v = \frac{V_h - \Delta V_1}{V_h} = 1 - \frac{V_0}{V_h} \left[\left(\frac{p_d}{p_s} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right] = 1 - \alpha (\epsilon^{\frac{1}{m}} - 1) \quad (10.6)$$

式中 α ——相对余隙容积 ($\alpha = \frac{V_0}{V_n}$)，其大小主要取决于气阀在气缸上的布置方式以及压缩的级次等，一般 α 在下列范围内：低压级 0.07~0.12；中压级 0.09~0.14；高压级 0.11~0.16；

ϵ ——级的实际压力比 ($\epsilon = \frac{p_d}{p_s}$)，一般情况下，用名义压力比 ($\frac{p_2}{p_1}$) 来代替时，对 λ_v 产生的误差也不会太大。单级压力比一般在 3~4，压力比过大，会使 λ_v 降低，也会使排气温度升高；

m ——膨胀过程指数，主要取决于气体的性质以及余隙气体在膨胀过程中与缸壁的热交换情况，一般 $m < k$ ，高压级的 m 接近于 k ；

V_0 ——余隙容积， m^3 ；

p_d, p_s ——气缸内的实际排气压力和实际进气压力，Pa， $p_d > p_2$ 、 $p_s < p_1$ 。

② 压力系数 λ_p 反映了由于进气阀阻力的存在致使实际进气压力 p_s 小于名义进气压力 p_1 ，从而造成进气量减少的程度。压力系数主要取决于进气阀处于关闭状态时的弹簧力以及进气管中的压力波动情况。对于低压级 $\lambda_p = 0.95 \sim 0.98$ ；高压级 $\lambda_p = 0.98 \sim 1.0$ 。压力系数可近似地表示为

$$\lambda_p = \frac{p_s}{p_1} = 1 - \frac{\Delta p_s}{p_1} \quad (10.7)$$

式中 Δp_s ——进气阀阻力，Pa。

③ 温度系数 λ_T 表示进气过程中气体从缸壁等部件吸收热量造成体积膨胀，从而造成进气量减少的程度。温度系数与气缸的冷却状况和级的压力比的大小有关。气体在进气过程中得到的热量越多，温度系数越小。

(4) 多级压缩过程

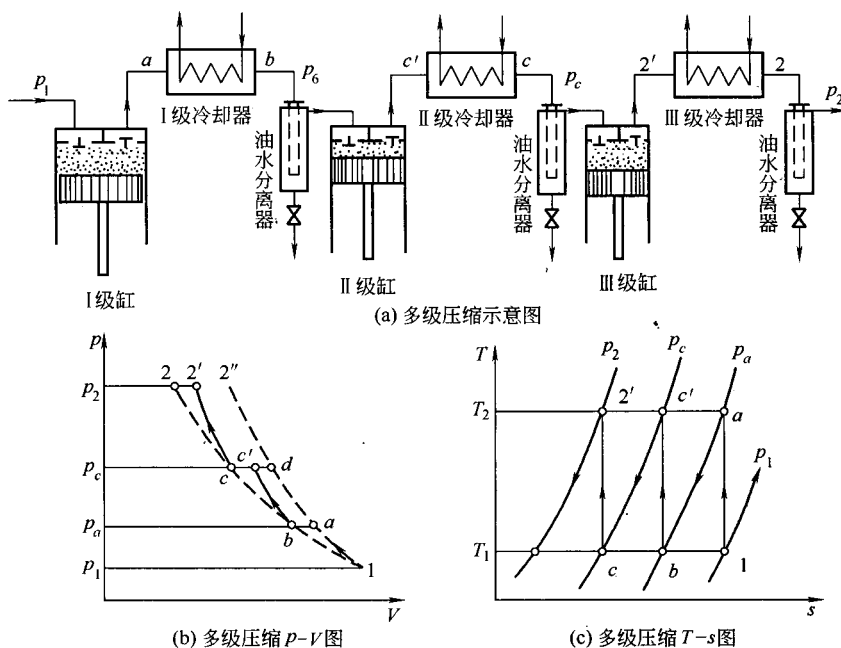


图 10.5 多级压缩示意图及其 p - V 、 T - s 图