

旋转压缩机

马国远 李红旗 著



机械工业出版社
China Machine Press

旋 转 压 缩 机

马国远 李红旗 著
郁永章 审

马国远 李红旗 著
郁永章 审



机 械 工 业 出 版 社

旋转压缩机性能优良、结构紧凑、零部件少、工作寿命长，广泛应用于房间空调、制冷器具、汽车空调及压缩气体装置。本书介绍了旋转压缩机的发展与现状、工作原理、结构特点及适用范围；着重介绍滚动活塞压缩机和滑片压缩机的基础理论、工程设计方法、结构优化、计算机模拟、加工装配及典型结构；对近年来为提高性能和适应环保要求而提出旋转压缩机的一些新颖结构也作了介绍。

本书是目前国内唯一系统全面地论述旋转压缩机的专著，适合制冷、空调、流体机械及化工机械等专业中等以上工程技术人员阅读，也可供大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

旋转压缩机/马国远，李红旗著，—北京：机械工业出版社，
2001.4
ISBN7-111-08688-0

I. 旋… II. ①马…②李… III. 回转式压缩机 IV. TH455

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 88035 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：蒋有彩 版式设计：张世琴 责任校对：李汝庚

封面设计：方 芬 责任印制：路 琳

北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷

850mm×1168mm^{1/32}·9 印张·239 千字

0 001—3 000 册

定价：18.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

序

20 世纪的最后 20 年，对中国来讲是发展最快的 20 年。在这种发展中，我国的压缩机生产也取得了巨大进展，一些机种从无到有，并且产量不断上升，仅就滚动活塞压缩机而言，其年产量已近一千万台。毫无疑问，我国已居世界压缩机生产大国之林。

旋转压缩机相对往复压缩机而言，有其无可比拟的优点，即具有零部件少、质量轻、平衡性好。由于其工作腔大都依靠线接触密封的结构特点，使它难以胜任获得高压力的应用或工作腔不易承受大压力差。因此，它们往往特别适用于一般只需单级压缩，并且最高压力不超过 5MPa 的制冷系统，以及其它类似压力的场合。

旋转压缩机中的滚动活塞压缩机，用于冰箱的制冷系统中是很合适的。本质上讲，它比往复压缩机的噪声要低，因为它没有进气阀形成的敲击声，它的平衡性比往复式好，可靠性要比往复式高，尤其是要想在冰箱中采用变频压缩机来制成变冷量系统，其变频幅度及易于实现的程度，都将优于往复式结构；一般讲，其价格也低于往复式。但是，由于往复式结构采取了较好的消声措施，使得往复式冰箱压缩机的噪声一般要比旋转式低 1~2dB(A)；此外，由于旋转式无进气阀，而冰箱制冷系统又要求具有逆止职能，因此要加装一个止回阀，这使原来用往复压缩机的冰箱生产线难以适应。诸如此类的因素，使得旋转式结构在冰箱中的应用受到了很大的阻力。可以预期，只要旋转压缩机在消声方面作出足够的努力，如果把止回阀也设置在全封闭的壳体里，它将会在冰箱的制冷系统中占有统治地位。

在我国，旋转式压缩机的研究已很多，发表有许多文章，其中包括硕士、博士论文，但如此系统地介绍滚动活塞与滑片压缩

机还是第一次。作者在此方面做过许多深入细致的研究，并有一定的创见，相信本书的出版将有益于从事压缩机生产、研究以及正在学习压缩机的人们。

郁永章

2001 年 1 月

前 言

作匀速旋转运动的转子安装在圆柱形的气缸中，再配置若干个作往复运动的滑片(板)，就能形成容积周期变化的工作腔，旋转压缩机正是利用这种运动机构进行工作的。自1588年拉迈利(Ramelli)首次提出多基元滑片装置的概念以来，人们设计和研制出的旋转压缩机结构有数十种之多，而真正得到广泛应用的只有滚动活塞压缩机和滑片压缩机。近三十年来，随着精密加工技术的不断提高，旋转压缩机的发展非常迅速，研究异常活跃，国内外的许多学者和工程技术人员在旋转压缩机的理论研究和工程实践方面做了大量的工作，取得了巨大的成就，使旋转压缩机技术日臻完善。旋转压缩机具有性能优良、结构紧凑、零部件少及工作寿命长等独特优点，目前已经在房间空调、制冷器具、汽车空调及压缩气体装置中得到广泛的应用。

为了适应我国旋转压缩机生产、应用与发展的需要，作者结合自己十多年来理论研究和生产实践的成果与心得体会，并吸收国内外的研究成果撰写成本书。书中介绍了旋转压缩机的发展与现状、工作原理、结构特点及适用范围；着重介绍滚动活塞压缩机和滑片压缩机的基础理论、工程设计方法、结构优化、计算机模拟、加工装配及典型结构；对近年来为了提高性能和适应环保要求而提出旋转压缩机的一些新颖结构也作了介绍。

本书是目前国内唯一全面系统地论述旋转压缩机的专著，适合制冷、空调、流体机械及化工机械等专业中等以上工程技术人员阅读，也可供大专院校师生参考。

本书撰写分工情况如下：第2章李红旗；其余部分马国远。全书由马国远统稿，由西安交通大学郁永章教授主审。郁教授在审阅时提出过许多建议，对作者很有启发和帮助。本书2.4.3节

滚动活塞压缩机主要零件的部分图样，由李庆元高级工程师提供；3.7.1节滑片空气压缩机的结构图，由谭跃进高级工程师提供；6.5.2节滚动活塞压缩机的性能模拟曲线，采用郑学鹏硕士的计算结果；朱明善教授提供了替代制冷工质的部分资料；李富平同志为本书绘制部分插图。在本书撰写过程中，西安庆安制冷设备股份有限公司给予有力的支持并提供部分技术资料。在此谨向他们表示衷心的感谢。

旋转压缩机发展相当迅速，加上作者水平和认识上的限制，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

马国远
2001年元月

目 录

序

前言

第1章 旋转压缩机概述	1
1.1 结构型式与特点	1
1.2 工作过程	4
1.2.1 实际结构因素的影响	5
1.2.2 实际不可逆因素的影响	7
1.3 工作容积、功率、效率和排气温度	8
1.3.1 工作容积	8
1.3.2 容积效率	9
1.3.3 功率和效率	9
1.3.4 排气温度	13
1.4 替代 CFC 和 HCFC 的制冷工质	14
第2章 滚动活塞压缩机	22
2.1 工作原理与特点	22
2.1.1 工作原理	22
2.1.2 特点及发展方向	25
2.1.3 主要型式和适用范围	28
2.2 工作过程的热力学分析	29
2.2.1 工作腔的容积与压力	29
2.2.2 容积效率与输气量	31
2.3 运动机构的动力学分析	40
2.3.1 运动与受力分析	40
2.3.2 阻力矩	50
2.3.3 惯性力的平衡	52
2.4 结构参数与结构设计	55

2.4.1 主要结构参数	55
2.4.2 结构尺寸	59
2.4.3 主要零件结构	60
2.4.4 主要零件材料	65
2.4.5 结构设计	66
2.4.6 能量调节机构	69
2.5 典型结构	69
2.5.1 全封闭滚动活塞压缩机	70
2.5.2 开启式滚动活塞压缩机	80
第3章 滑片压缩机	92
3.1 工作原理与特点	92
3.1.1 单工作腔滑片压缩机	92
3.1.2 双工作腔滑片压缩机	95
3.1.3 贯穿滑片压缩机	96
3.2 气缸型线	97
3.2.1 单工作腔滑片压缩机的气缸型线	97
3.2.2 双工作腔滑片压缩机的气缸型线	98
3.2.3 贯穿滑片压缩机的气缸型线	112
3.3 基元容积和工作容积	116
3.3.1 几何关系	116
3.3.2 基元容积与工作容积	120
3.3.3 容积效率	124
3.4 功率与效率	125
3.4.1 指示功率	125
3.4.2 绝热效率	126
3.4.3 排气温度	126
3.5 作用力、转矩与强度校核	126
3.5.1 滑片运动的速度与加速度	126
3.5.2 滑片受力分析	130
3.5.3 转子受力分析	135
3.5.4 阻力矩	136
3.5.5 强度计算	137

3.6 结构与结构参数	140
3.6.1 内压缩与吸、排气孔口	140
3.6.2 结构参数与结构尺寸	143
3.6.3 滑片倾角最佳值的探讨	147
3.6.4 滑片端部形状	152
3.6.5 滑片背部最佳压力及其实现机构的探讨	156
3.6.6 滑片压缩机的特殊结构	160
3.6.7 双层滑片结构的探讨	162
3.6.8 其它特殊的滑片结构	170
3.6.9 滑片材料	172
3.7 典型结构示例	172
3.7.1 滑片空气压缩机	172
3.7.2 汽车空调用滑片压缩机	176
3.7.3 滑片压缩-膨胀机	180
3.7.4 旋片真空泵	182
3.7.5 CO ₂ 滑片压缩机	183
第4章 摆动转子压缩机	186
4.1 概述	186
4.1.1 工作原理	186
4.1.2 特点	187
4.1.3 应用	188
4.2 工作容积与热力计算	188
4.3 动力学分析	189
4.3.1 运动分析	189
4.3.2 阻力矩	192
4.3.3 惯性力及平衡	193
4.4 结构参数与结构尺寸	195
4.4.1 结构参数	195
4.4.2 结构尺寸	195
4.5 典型结构	196
第5章 新颖结构的旋转压缩机	197
5.1 转缸滚动活塞压缩机	197

5.1.1 概述	197
5.1.2 转缸机构原理与分析	199
5.1.3 运动与受力分析	200
5.1.4 阻力矩	205
5.1.5 结构示例	206
5.2 双作用滚动活塞压缩机	207
5.2.1 概述	207
5.2.2 设计计算	209
5.2.3 结构示例	212
5.3 新型摆动转子压缩机	214
5.3.1 概述	214
5.3.2 力学分析	215
5.4 凸轮转子压缩机	219
5.5 椭圆缸单工作腔滑片压缩机	219
5.6 轴向滑片压缩机	221
第 6 章 旋转压缩机的计算机模拟	222
6.1 模拟的基本方程	222
6.1.1 热力学基本方程	222
6.1.2 控制容积	225
6.1.3 工质状态方程	230
6.1.4 控制容积方程和其它几何关系	230
6.2 压缩机工作过程的数学描述	233
6.2.1 压缩功	233
6.2.2 泄漏模型	233
6.2.3 吸气质量流量	250
6.2.4 排气质量流量	251
6.2.5 工质与外界的热交换量	254
6.2.6 吸排气过程的节流效应	256
6.3 机械摩擦损失分析	258
6.3.1 滚动活塞压缩机	258
6.3.2 滑片压缩机	261
6.4 压缩机性能的计算和模拟模型的验证	262

6.4.1 模型求解的数值方法	262
6.4.2 压缩机性能的计算	263
6.4.3 模拟模型的验证	264
6.5 模拟分析应用示例	265
6.5.1 双工作腔滑片压缩机结构参数的优化	265
6.5.2 滚动活塞压缩机变频运行和采用 R407C 的研究	269
参考文献	274

第 1 章 旋转压缩机概述

1.1 结构型式与特点

只要将几个构件恰当地组合起来,形成周期性变化的密封工作容积,并可以进行压缩机的工作循环和功率传输,这样就获得了一种压缩机方案。由曲轴和连杆组成的曲柄连杆机构,驱动活塞在气缸内作往复直线运动的往复活塞压缩机,是压缩机最理想的机型之一。它具有良好的气体密封性、可靠性及经济性,在压缩机的发展历史上有过辉煌的历史,至今仍应用得十分广泛。由于往复机构存在下列缺陷,使其进一步的发展受到很大的限制。

1) 由于往复质量引起的往复惯性力和惯性力矩不能得到完全平衡,使压缩机转速和功率的提高受到很大的限制。

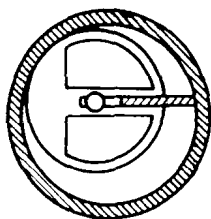
2) 往复压缩机的曲柄连杆机构,使整机重量的减轻和外形尺寸进一步缩小有困难。

3) 气阀的存在不仅增加压缩机的重量和零件,使压缩机噪声增大,而且使变频困难。

如果用旋转运动的活塞代替往复运动的活塞来实现气体的压缩,从机构学来分析,无疑是极为合理的。然而仅有转子和缸体两个构件是不可能形成容积周期变化的工作腔,必需增添辅助的构件。添置不同的辅助构件就形成各种各样的回转压缩机方案。如果增添若干个可以在转子或缸体上开的槽内自由滑动的叶片(简称滑片),就形成了滑片式旋转压缩机,简称旋转压缩机。

1588 年拉迈尔利(Ramelli)首次提出多基元滑片装置的概念,并制成了世界上第一台拉迈尔利泵,如图 1-1 所示。在旋转压缩机中,气缸体固定不动,转子在缸体内作均匀角速度的旋转运动,因此它属于匀速型旋转压缩机。根据滑片安装的位置不同,

旋转压缩机分为两大类：一类是滑片装在缸体上的槽内，因滑片不随转子做旋转运动，称之为固定滑(叶)片压缩机，即大家熟知的滚动活塞压缩机或滚动转子压缩机，如图 1-2a 所示。



固定滑片压缩机的另一种衍生结构如图 1-2b 所示，滑片与套在转子上的滚环做成一体，转子带动滚环转动，滑片绕气缸上部导轨中心左右摆动，这种结构称之为摆动转子压缩机。

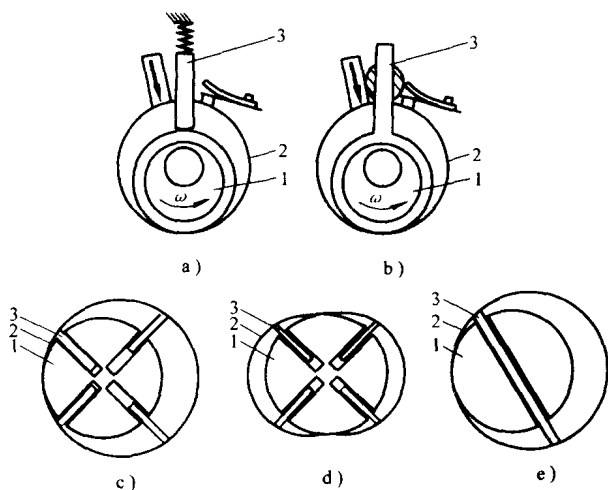


图 1-2 旋转压缩机的主要型式

a) 滚动活塞 b) 摆动转子

c) 单工作腔滑片 d) 双工作腔滑片 e) 贯穿滑片

1—转子 2—气缸 3—滑片(板)

另一类是滑片装在转子上的槽内，随转子一起做旋转运动，这种结构称之为旋转滑(叶)片压缩机，简称滑片、旋叶或旋片压缩机。滑片压缩机大致可分成下列几种：第一种结构如图 1-2c 所示，缸体呈圆形，转子的几何中心与缸体不同心，单个或多个滑片在转子的槽中来回运动，由于受离心力和弹簧力作用，紧压

在缸体内圆面上。这是滑片压缩机的传统结构型式，由于转子与缸体偏心配置，只形成一个月牙形空间，称之为单工作腔滑片压缩机。第二种结构如图 1-2d 所示，缸体为椭(扁)圆形，活塞几何中心与缸体的几何中心一致，形成两个月牙形空间，称之为双工作腔滑片压缩机。第三种结构如图 1-2e 所示，滑片安装在贯穿转子断面的通槽内，滑片两端直接受缸体型面约束，并在槽内来回运动，为了保证滑片两端的密封，缸体型线理论上必须与滑片端部的运动轨迹吻合，此类结构称为贯穿滑片压缩机。

从以上介绍可以看出旋转压缩机有以下特点：

1) 旋转压缩机没有往复运动的传动机构，不需要吸气阀，有的结构也可以不设排气阀，因此零部件(特别是易损件)少、结构简单、容易制造、成本较低，同时操作简便、不维修运转周期长、易于实现自动化。

2) 与往复压缩机一样，旋转压缩机也属于容积式压缩机，具有强制输气的特征，即输气量与排气压力几乎无关。

3) 旋转压缩机具有良好的动力平衡性能，可以适应较高的工作转速。转速高不仅使机器外形尺寸小、重量轻，而且还使其输气均匀、气流脉动小。

4) 旋转压缩机的工作腔随转子转动不断地变更位置，因此工作腔通常采用间隙密封。这样一来，过大的间隙必然导致内部泄漏增加，降低机器的性能；过小的间隙又容易引起运动件间的直接接触而使摩擦增大、可靠性降低，所以对旋转压缩机内部的间隙必须进行严格控制，致使滚动活塞压缩机的加工、安装比较复杂，同时检修也不大方便。

旋转压缩机主要用于批量大的专用制冷机组，如房间空调器、单元式空调机、家用制冷器具及汽车空调装置等，在大中型制冷设备中有所应用，但远不及往复压缩机普遍。单工作腔滑片压缩机比较普遍地用作中小型空气压缩机，特别是无油压缩机。旋转压缩机还广泛地作为机械真空泵使用，以产生粗真空，但由于使用条件和工作压力不同，结构应作相应变化。

近年来, 旋转压缩机的研究主要集中在提高效率 and 可靠性、降低噪声和成本, 以及延长工作寿命, 充分发挥其优点并逐步扩大其应用领域, 同时研制新型结构的旋转压缩机。

1.2 工作过程

旋转压缩机转子的每个运动周期内, 分别有若干个工作单元依次进行相同的工作过程, 只需研究其中某一工作单元的整个工作过程, 就能完全了解压缩机工作的全貌, 这一工作单元称为旋转压缩机的基元。

设转子旋转一个周期 T , 基元完成压缩机的一个完整工作过程(称工作循环), 因此基元的容积是随转子转角发生变化的, 如图 1-3a 所示。图中假设最小基元容积为零, 且以最小基元容积所处的位置作为转角计算的起点。与往复压缩机相比拟, 最大基元容积相当于行程容积, 它即为基元吸入气体的容积。

在理想的情况下, 每一基元当其容积增加时, 便与吸气管道连通, 吸入气体, 并于基元容积达到最大时, 终止吸气(图 1-3b 中的吸气过程 1-2); 然后基元封闭, 容积不断缩小, 压力一直升高(压缩过程 2-3); 最后, 压力升高到所需要的压力时, 基元与排气管道连通, 其内的气体排入排气管道(排气过程 3-4)。在图 1-3b 中, 过程 2—3'、2—3''、2—3''' 分别表示压缩过程为绝热、多方、等温过程时的情况。

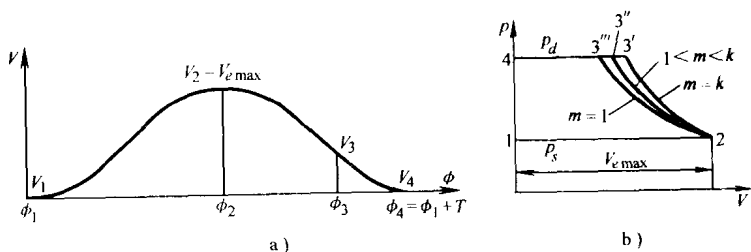


图 1-3 旋转压缩机基元的理论工作循环

a) 基元容积随转子转角的变化 b) 理论工作循环的 p - V 图

以上分析的是理想情况下的旋转压缩机工作循环，称为理论循环。旋转压缩机的实际循环还受到实际结构和不可逆等诸多因素的影响。

1.2.1 实际结构因素的影响

实际的旋转压缩机中，由于结构的制约，最小基元容积通常不为零，往往还会出现吸气开始和排气终止不在基元容积最小的位置，吸气终止和压缩开始不在基元容积最大的位置，以及与排气孔口连通瞬间基元内的压力不等于排气管内的压力等情况。这时基元容积随转角的变化见图 1-4a，工作循环的 p - V 图如图 1-4b 所示。下面分析这些情况对工作循环的影响。

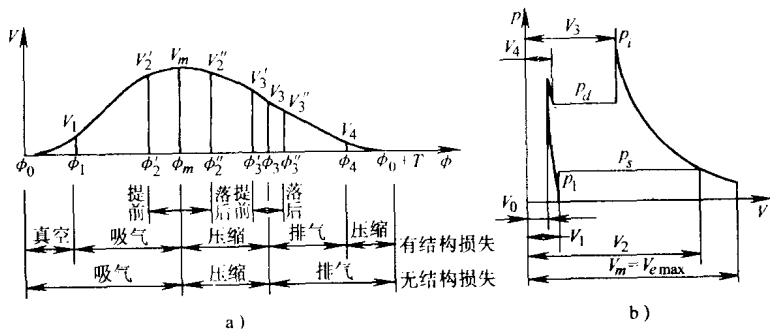


图 1-4 考虑到实际结构因素影响的旋转压缩机基元工作循环

a) 基元容积随转子转角的变化 b) 工作循环的 p - V 图

1. 封闭容积的影响

如果基元不在最小容积时开始吸入气体，基元在与吸气孔口连通之前形成吸气封闭容积。若不考虑泄漏的影响，由于它的存在，使基元在容积扩大的初期，其内的气体压力低于吸气孔口处的气体压力。然后在基元与吸气孔口连通时，出现定容压缩，使基元内气体压力迅速升高至吸气压力后，才进行正常的吸气过程。所以，吸气封闭容积的存在影响了基元的正常吸气。

如果排气过程不在最小基元容积时终止，基元在与排气孔口脱离后，将产生排气封闭容积。理论上，该容积内的气体将被压