

# 透平式压缩机

黄钟岳 王晓放 王 巍 编著

The Second Edition

第二版

TOUPINGSHI  
YASUOJI



化学工业出版社

# 透平式压缩机

黄钟岳 王晓放 王 巍 编著

第二版



化学工业出版社

· 北京 ·

本书简述了透平式压缩机的气体热力学和气动力学基础,系统论述了透平式压缩机的基本结构、工作原理、性能曲线和调节方法、非稳定工况和防喘控制原理以及运行有关知识,以及干气密封、磁悬浮轴承、气体动力轴承以及数字直接控制系统的应用等;还介绍了本书作者及其科研团队近年来在透平式压缩机性能研究方面所取得的一些新成果,以具有自主知识产权的“透平式压缩机热力性能高速在线评估通用软件系统(CPES-03)”为例,重点介绍了透平式压缩机热力性能评估思想及方法。此外,书中还专门介绍了引进大型化肥厂和乙烯装置典型压缩机的结构及特点、根据压缩机复杂介质热物性参数对压缩机性能影响的重要性,在对真实气体的状态方程、真实气体热力学性质的计算、空化气蚀计算新进展等内容做了较大修改和补充。

本书内容丰富,理论联系实际,论述深入浅出,便于自学。本书作为高等院校相关专业的教材或教学参考用书,还可供从事透平式压缩机的研究、设计、运行和管理的科研及工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

透平式压缩机/黄钟岳,王晓放,王巍编著. —2版. —北京:  
化学工业出版社, 2013.9

ISBN 978-7-122-18222-7

I. ①透… II. ①黄…②王…③王… III. ①透平式压缩机-基  
本知识 IV. ①TH454

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第198138号

---

责任编辑:张兴辉

责任校对:边涛

装帧设计:王晓宇

---

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)

印装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张19 $\frac{3}{4}$  字数557千字 2014年1月北京第2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:78.00元

版权所有 违者必究

## 第二版前言

《透平式压缩机》一书内容丰富，工程针对性强，又兼顾了涡轮机专业教学需要，第一版自 2004 年 8 月出版以来，得到了广大透平机械领域的高校学生、研究人员、技术工作者等读者以及透平式压缩机设计和制造企业的肯定与欢迎，供不应求，很快售罄。

为了适应透平压缩机在产品设计、性能计算、应用领域及技术开发等诸方面的发展和进步，收集并整理了为企业解决技术难题过程中的经验，著者还在总结、凝练了近几年包括 973 项目“核主泵制造关键科学问题”等科研工作的部分最新成果，结合相关理论知识，对《透平式压缩机》第一版进行重新修订。

时隔十年，本次的修订继续保持原有风格和结构，力求基本概念清晰，结合工程实际，重点介绍透平式压缩机的原理和结构、设计方法，并注意到与流体力学及工程热力学等选修课的联系，避免不必要的重复，并留出自学空间，以满足相应高校专业教学需要。同时，兼顾工程技术人员、设计人员、运行管理者的需求特点，力求内容全面、实用，将透平式压缩机的原理和结构、设计方法与运行管理知识融合起来，各取所需，做到通俗易懂。通过更新内容，力求反映透平式压缩机最新发展成果，以进一步提升本书的系统性、先进性、全面性和实用性水平，以飨读者。

再版过程中，正值黄钟岳教授逝世三周年之际，以此书作为对黄教授最好的怀念！特别感谢黄钟岳教授夫人王维整教授对再版本书的理解与热情鼓励；还要感谢硕士研究生林茵对本书再版附录所做的部分计算分析工作；硕士研究生邵文洋、张文龙在第二版书稿修改过程中对本书的勘误及提出的宝贵意见；同时感谢对本书给予极大关注的研究所同事们。

由于作者水平有限，书中不当之处在所难免，殷切希望读者在阅读本书过程中继续提出宝贵意见和建议。

编著者

# 主要符号说明

|                           |                          |
|---------------------------|--------------------------|
| $G$ —气体质量流量               | $\epsilon$ —压力比          |
| $P$ —功率                   | $p$ —气体压力                |
| $W$ —功；相对速度矢量             | $\rho$ —气体密度             |
| $n$ —转速                   | $R$ —气体常数；半径             |
| $n_s$ —比转速                | $S$ —气体的熵；间隙值            |
| $T$ —气体热力学温度              | $s$ —气体比熵                |
| $V$ —体积                   | $w$ —气流相对速度              |
| $v$ —气体比容                 | $\omega$ —旋转角速度          |
| $i$ —气体的焓，叶片进口冲角          | $M$ —马赫数；力矩              |
| $c$ —气流绝对速度               | $k$ —绝热指数；比热容比           |
| $u$ —叶轮圆周速度               | $c_v$ —比定容热容             |
| $a$ —声速                   | $c_x$ —阻力系数              |
| $Re$ —雷诺数                 | $c_y$ —升力系数              |
| $c_p$ —比定压热容              | $h$ —理论能量头               |
| $m$ —多变指数；气体质量            | $h_s$ —等熵能量头             |
| $h_p$ —多变能量头              | $h_r$ —流动损失能量头           |
| $h_{tot}$ —总能量头           | $h_i$ —轮阻损失能量头           |
| $h_l$ —漏气损失能量头            | $\eta_p$ —多变效率           |
| $\lambda$ —损失系数           | $\eta_m$ —机械效率           |
| $\eta_T$ —等温效率            | $\mu$ —黏度；滑移系数；分子量       |
| $\eta_s$ —绝热效率            | $\beta$ —气流相对速度方向角       |
| $\alpha$ —气流绝对速度方向角       | $\beta_A$ —叶轮叶片几何角       |
| $\alpha_A$ —扩压器、回流器、叶片几何角 | $\varphi_{2u}$ —叶轮周向分速系数 |
| $\varphi_r$ —流量系数；径向分速系数  | $\Omega$ —反动度            |
| $\bar{h}$ —理论能量头系数        | $r$ —半径                  |
| $D$ —直径                   | $l$ —叶片高度                |
| $b$ —叶轮叶片宽度；叶片弦长          | $z$ —叶片数目；密封齿数目；级数       |
| $F$ —流通面积                 | $\tau$ —叶片阻塞系数；剪应力       |
| <b>透平式压缩机特征截面：</b>        |                          |
| $a$ — $a$ —压缩机（或级）进口截面    | <b>离心式级特征截面：</b>         |
| $d$ — $d$ —压缩机（或级）出口截面    | 0—0—叶轮进口截面               |
| <b>轴流式压缩机级特征截面：</b>       |                          |
| 1—1—动叶进口截面                | 1—1—叶片进口截面               |
| 2—2—动叶出口即静叶出口截面           | 2—2—叶轮出口截面               |
| 3—3—静叶出口截面                | 3—3—扩压器进口截面              |
| $Q$ —容积流量；热量              | 4—4—扩压器出口截面              |
|                           | 5—5—回流器进口截面              |
|                           | 6—6—回流器出口截面              |

# 目 录

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 绪论 .....                             | 1   |
| 第一节 透平式压缩机的分类 .....                  | 1   |
| 第二节 透平式压缩机结构组成与工作原理 .....            | 1   |
| 第三节 透平式压缩机发展概况 .....                 | 5   |
| 第一章 气体热力学和气体动力学基础 .....              | 8   |
| 第一节 气体状态方程式 .....                    | 8   |
| 第二节 热力学第一定律和第二定律 .....               | 11  |
| 第三节 理想气体混合物、湿空气基本性质 .....            | 17  |
| 第四节 一元定常流动的基本方程 .....                | 22  |
| 第五节 气体的压缩过程 .....                    | 28  |
| 第六节 几个基本概念 .....                     | 42  |
| 第七节 真实气体状态方程及其对气体热力学性质的计算方法 .....    | 52  |
| 第二章 离心式压缩机基本理论 .....                 | 64  |
| 第一节 进气室 .....                        | 64  |
| 第二节 叶轮 .....                         | 66  |
| 第三节 扩压器 .....                        | 86  |
| 第四节 弯道、回流器和排气室 .....                 | 91  |
| 第五节 压缩机的效率与功率 .....                  | 96  |
| 第六节 压缩机的中间冷却和分段 .....                | 98  |
| 第七节 离心式压缩机的热力计算 .....                | 100 |
| 第三章 离心式压缩机基本结构 .....                 | 112 |
| 第一节 气缸和隔板 .....                      | 112 |
| 第二节 离心式压缩机转子 .....                   | 114 |
| 第三节 离心式压缩机叶轮 .....                   | 117 |
| 第四节 离心式压缩机转子气体轴向推力及其平衡方法 .....       | 121 |
| 第五节 压缩机密封 .....                      | 126 |
| 第六节 轴承 .....                         | 137 |
| 第七节 转子动力学问题 .....                    | 150 |
| 第四章 轴流式压缩机基本理论 .....                 | 157 |
| 第一节 轴流式压缩机基元级的反动度 .....              | 157 |
| 第二节 轴流式压缩机平面叶栅的升力和阻力、升力系数和阻力系数 ..... | 159 |
| 第三节 叶栅效率、基元级效率和叶栅效率的关系 .....         | 161 |
| 第四节 平面叶栅试验数据 .....                   | 163 |
| 第五节 轴流式压缩机级圆柱面流动理论的叶片扭曲规律 .....      | 171 |
| 第六节 轴流式压缩机级的损失和效率 .....              | 176 |
| 第七节 跨声速级和超声速级的特点 .....               | 180 |
| 第八节 多级轴流式压缩机 .....                   | 182 |
| 第九节 轴流式压缩机基本结构 .....                 | 190 |
| 第五章 透平式压缩机变动工况 .....                 | 195 |
| 第一节 透平式压缩机的流量特性 .....                | 195 |
| 第二节 透平式压缩机的相似条件 .....                | 203 |
| 第三节 透平式压缩机性能换算和通用特性线 .....           | 206 |
| 第四节 透平式压缩机的模化设计 .....                | 211 |

|                   |                                       |            |
|-------------------|---------------------------------------|------------|
| 第五节               | 透平式压缩机的调节方法 .....                     | 213        |
| 第六节               | 透平式压缩机的阻塞工况与非稳定工况 .....               | 218        |
| 第七节               | 喘振控制的进展 .....                         | 227        |
| <b>第六章</b>        | <b>透平式压缩机热力性能评估与分析 .....</b>          | <b>236</b> |
| 第一节               | 概述 .....                              | 236        |
| 第二节               | 透平式压缩机运行热力性能评估 .....                  | 239        |
| 第三节               | 透平式压缩机热力性能在线监测与状态评估 (CPES) 系统简介 ..... | 242        |
| 第四节               | 热力状态参数和几何尺寸变化对性能的影响分析计算 .....         | 247        |
| 第五节               | 透平式压缩机运行性能衰退原因分析 .....                | 250        |
| <b>第七章</b>        | <b>大型合成氨、尿素和乙烯装置中的透平式压缩机 .....</b>    | <b>253</b> |
| 第一节               | 大型化肥厂的透平式压缩机 .....                    | 253        |
| 第二节               | 乙烯装置离心式压缩机 .....                      | 271        |
| <b>第八章</b>        | <b>透平式压缩机的安装和运行基本知识 .....</b>         | <b>278</b> |
| 第一节               | 压缩机的安装 .....                          | 278        |
| 第二节               | 油路清洗 .....                            | 285        |
| 第三节               | 压缩机运行要点 .....                         | 286        |
| <b>附录</b> .....   |                                       | <b>290</b> |
| 附录一               | 国际单位 (代号 SI) 和常用工程单位的换算 .....         | 290        |
| 附录二               | 各种气体的热力学特性表 .....                     | 292        |
| 附录三               | 美荷型装置的离心式压缩机性能数据表 .....               | 294        |
| 附录四               | 核主泵空化性能研究 .....                       | 297        |
| <b>参考文献</b> ..... |                                       | <b>307</b> |

# 绪 论

## 第一节 透平式压缩机的分类

在国民经济许多领域，特别是在采矿、石油、化工、制冷、动力和冶金等部门中广泛地使用压缩机来输送气体和提高气体的压力。压缩机种类繁多，尽管用途可能一样，但其结构形式和工作原理都可能有很大的不同。大家知道，气体的压力取决于单位时间内气体分子撞击单位面积的次数与强烈程度，如果增加容积内气体的温度，使气体分子运动的速度增加，可以使气体压力提高，但当温度降下来，气体压力又随之降低，而一般要求被压缩的气体应具有不高的温度，故此法不可取。因此，提高气体压力的主要方法就是增加单位容积内气体分子数目，也就是缩短分子间距离。通过减少气体所占据的封闭空间的容积，来提高气体的压力，是容积式压缩机（活塞式、滑片式、罗茨式、螺杆式等等）的基本工作原理；利用惯性的方法，通过气流的不断加速、继而减速，因惯性而彼此被挤压，缩短分子间的距离，来提高气体的压力，透平式压缩机的工作原理属于这一类。

透平式压缩机是一种叶片式旋转机械，它利用叶片和气体的相互作用，提高气体的压力和动能，并利用相继的流通元件使气流减速，将动能转变为压力的提高。一般透平式压缩机可以进行如下分类。

### 1. 按气体主要运动方向分

(1) 离心式。气体在压缩机内大致径向流动。

(2) 轴流式。气体在压缩机内大致沿平行于轴线方向流动。

(3) 轴流离心组合式。有时在轴流式的高压段配以离心式段，形成轴流、离心组合式压缩机。

此外，还有既非径向亦非轴向的混流式叶轮，它常用于大流量离心式级中，不单独分为一类。

### 2. 按排气压力 $p_d$ 分

(1) 通风机。 $p_d < 1.42 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ （表压）。

(2) 鼓风机。 $p_d = 1.42 \times 10^4 \sim 2.45 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ （表压）。

(3) 压缩机。 $p_d > 2.45 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ （表压）。

### 3. 按用途和被处理的介质命名

如化工透平式压缩机、制冷压缩机、高炉鼓风机、空气压缩机、二氧化碳压缩机、天然气压缩机、氮氢合成气压缩机等。

离心式和轴流式压缩机相比各有优缺点。轴流式压缩机具有效率高（设计工况下绝热效率可比离心式高出 5%~10%）、流量大等优点，但排气压力不高，稳定工作范围窄，对工质中的杂质敏感，叶片易受磨损；离心式压缩机则不同，除效率比轴流式压缩机低外，可达到很高的排气压力，允许输送较小的流量。

## 第二节 透平式压缩机结构组成与工作原理

### 一、离心式压缩机

从外观上看一台压缩机，首先看到的是机壳，它又称气缸（图 0-1 中的件 2），通常是用铸

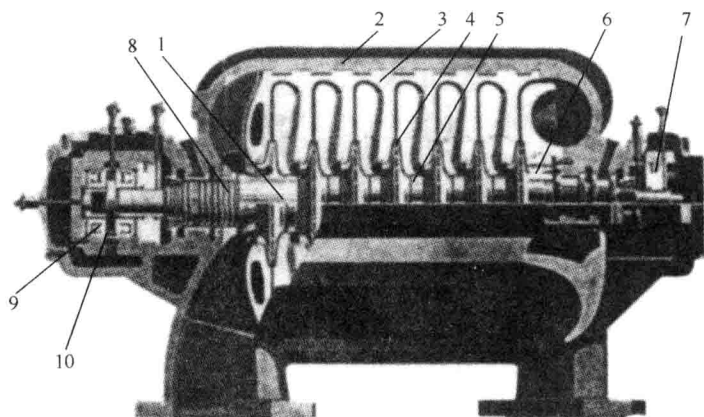


图 0-1 离心式压缩机

1—主轴；2—气缸；3—隔板；4—叶轮；5—定距套；6—平衡盘；7—支撑轴承；8—轴端密封；9—推力轴承；10—推力盘

铁或铸钢浇铸而成。一台高压离心式压缩机通常有两个或两个以上气缸，按其气体压力高低分别称为低压缸、中压缸和高压缸。

压缩机本体结构可以分为两大部分：转动部分，由主轴 1、叶轮 4（本压缩机共有 7 个叶轮）、平衡盘 6、叶轮间的定距套 5、推力盘 10 以及联轴用的半联轴器等零部件组成，称为转子；固定部分，由气缸 2、隔板 3（每个叶轮前后都配有隔板）、支撑轴承 7、推力轴承 9、轴端密封 8 等零部件组成，常称为定子。图 0-1 所示压缩机只有一个进气口和排气口，称为一段压缩，有的压缩机，气体从气缸中间排出，到缸外进行冷却后，再回到气缸内继续压缩，有的在中间抽出或补进气体一部分，有一次这样中间抽（或补进）的称为二段压缩，有的压缩机一个气缸可以有几个这样的段。

在压缩机理论中常常顺着气体流动路线，将压缩机分成若干个级。所谓级就是由一个叶轮和与之相配合的固定元件构成的基本单元。图 0-2 所示是压缩机中间的级，它包括叶轮（0—0~2—2）、扩压器（3—3~4—4）、弯道（4—4~5—5）和回流器（5—5~6—6）几个元件；压缩机每段进口处的级称为首级，除了上述元件外它还应包括进气室（a—a~0—0，其中，a—a 截面为进入管入口截面），而在压缩机每段排气口处的级称为末级，它就没有弯道和回流器，而代之以排气室（图 0-1），有的压缩机甚至连扩压器元件也没有，气体从叶轮出来直接进入排气室。可见，每级都必须有叶轮，由于级在段中所处的位置不同而有不同的固定元件相配合。一个压缩段可以有一个级也可以有许多级。为了对压缩机级的通流元件作用有个了解，分别叙述如下。

（1）进气室 在每段第一级入口都设有吸气室，将气体从进气管均匀地引入叶轮进行压缩。图 0-3 为压缩机首级叶轮和进气室。

（2）叶轮 叶轮又称工作轮，是压缩机中最重要的部件。它随轴高速旋转，气体在叶轮中受旋转离心力和扩压流动的作用，由叶轮出来后，压力和速度都得到提高。从能量转换观点来看，压缩机中叶轮是将机械能传给气体，以提高气体能量的唯一元件。

（3）扩压器 气体从叶轮流时，具有很高的流动速度，为了将这部分动能充分地转变为势能，以提高气体的压力，紧接叶轮设置了扩压器。一般扩压器有无叶扩压器和叶片扩压器，无叶扩压器是由前、后隔板组成的通道，而叶片扩压器则在前、后隔板之间设置叶片。无论何种扩压器随着直径的增大，通流面积都随之增加，使气流速度逐渐减慢，压力得到提高。

（4）弯道与回流器 为了把从扩压器出来的气体引导到下一级去继续压缩，设有使气流拐弯的弯道和把气流均匀地引入下一级叶轮入口的回流器。弯道是由隔板和气缸组成的通道，回流器则由两块隔板和装在隔板之间的叶片组成。

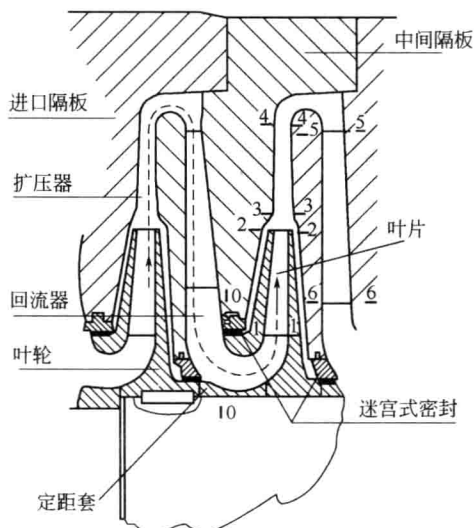


图 0-2 压缩机的中间级

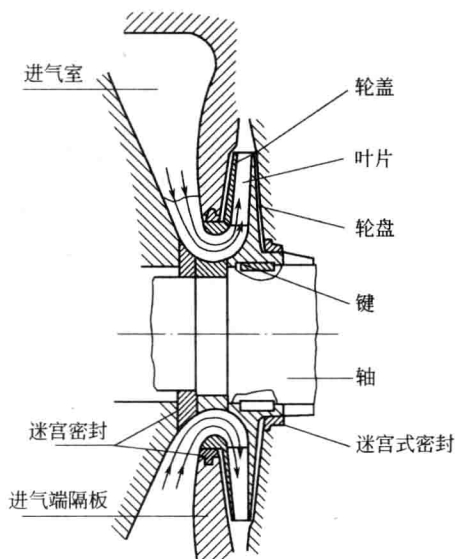


图 0-3 压缩机首级叶轮和进气室

(5) 蜗壳 蜗壳的主要作用是将从扩压器或从叶轮（在没有扩压器时）出来的气体汇集起来，并引出机外。在大多数的情况下，由于蜗壳外径逐渐增大，通流面积也增大，因此还可以起到一定的扩压作用。

离心式压缩机本体除了上述级元件外，还有许多元件，例如减少气体从叶轮出口倒流到叶轮入口的轮盖密封；减少级间漏气的定距套密封；减少气体向机外泄漏或从外吸入（压力低于外界压力时）的轴端密封；减少轴向推力的平衡盘；承受转子剩余轴向推力的止推轴承以及支撑转子的支持轴承等。

为了使压缩机持续安全、高效率地运转，还必须有一些辅助设备和系统。如油路系统、自动控制及保安系统等。具有中间冷却的压缩机还带有中间冷却器、冷却系统。有的压缩机还带有增速器。

## 二、轴流式压缩机

和离心式压缩机一样，轴流式压缩机的结构也分为转子和定子两部分。现以我国自行设计生产的 Z3250-46 轴流式压缩机（图 0-4）为例，对其通流部分的主要元件的功用叙述如下。

(1) 进气室 (11) 进气室的作用是使大气或从进气管来的气体均匀地进入环形收敛器。

(2) 收敛器 (13) 使进气室中的气流适当加速，以保证进气导流器的气流具有均匀的速度场和压力场。

(3) 进气导流器 (12) 由装在气缸上的均布叶片组成。使气流以一定速度和方向进入第一级动叶。

(4) 动叶 (5) 由装在转鼓 3（由轮盘焊接而成）上的叶片组成，它是轴流式压缩机对气体做功的唯一元件。每一列动叶与其后面的静叶（导流器）组合在一起，称为轴流式压缩机的级，该压缩机共有九级。转鼓和装在上面的动叶构成转子。转子高速旋转，带动叶片对气体做功，使气体在流出动叶时，速度和压力都提高。

(5) 静叶（导流器）(4) 由均匀装在气缸上的叶片组成。其作用有二：一是将从动叶出来的气体动能尽量转换成压力的提高，二是按要求使气流按照一定的方向和速度进入下一级继续进行压缩。

(6) 出口导流器 (8) 其功用是使末级导流器出来的气流沿叶高均变为轴向流动，以避免

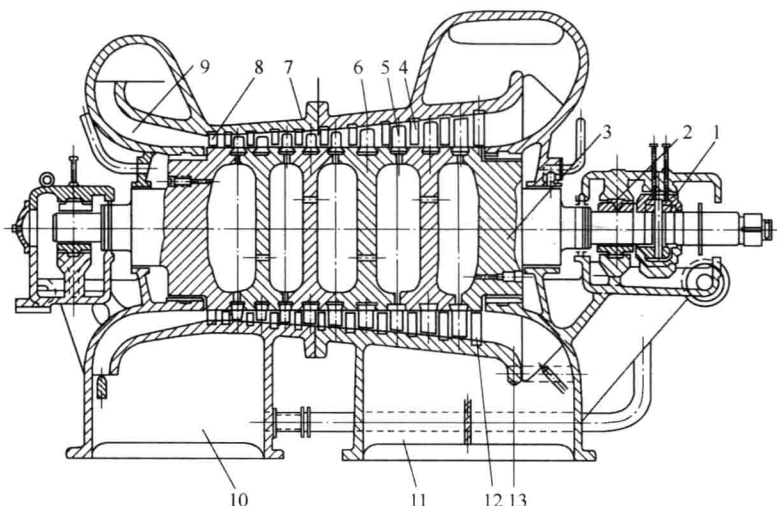


图 0-4 Z3250-46 轴流式压缩机

1—止推轴承；2—径向轴承；3—转鼓；4—静叶；5—动叶；6—前气缸；7—后气缸；8—出口导流器；  
9—扩压器；10—排气室；11—进气室；12—进气导流器；13—收敛器

气流在扩压器中由于旋绕运动而增加损失，降低效率。

(7) 扩压器 (9) 使从出口导流器出来的气流均匀地减速，进一步提高气体的压力。

(8) 排气室 (10) 将气流收集起来，经排气管排出。

除了上述通流部分元件外，和离心式压缩机一样，轴流式压缩机还有密封、支撑轴承、止推轴承等部件以及其他有关辅助设备和系统。

如前所述轴流式压缩机级由动叶和静叶组成 (图 0-5)，通常用 1—1, 2—2, 3—3 特征截面分别表示动叶进口 (即级进口)、动叶出口 (亦即静叶进口) 和静叶出口 (即级出口)。对于首级来说如果设有进口导流器，该级还应包括进口导流器在内，对末级还应包括整流器在内。为了研究这样的级常用相距  $dr$  的两个相邻圆柱面去截取一个微元环形段进行研究。这样截取的动叶栅和静叶栅分别称为基元动叶栅和基元静叶栅，由它们组成基元级。图 0-5 为基元级平面展开图，它是一种平面叶栅，叶型前缘与后缘间距离  $b$  和相邻两叶型间距离  $t$  分别称为弦长和栅距。对基元级来说可以忽略气流参数沿叶高  $dr$  的变化，实践证明，可

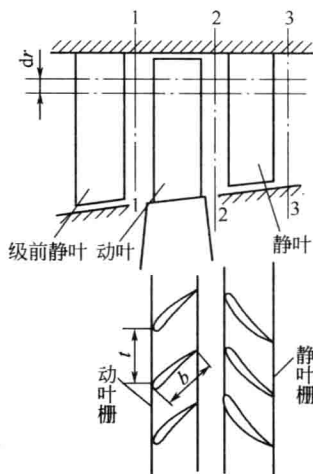


图 0-5 轴流式压缩机的级和基元级

可以用研究平面叶栅的方法来研究轴流式压缩机基元级。

### 三、透平式压缩机的主要性能参数

表征透平式压缩机性能的有如下主要参数。

#### 1. 流量

流量可以用容积流量也可以用质量流量。运输式 (指用于航空、交通运输等部门) 压缩机多用质量流量，单位常用  $\text{kg/s}$ ，固定式 (指运输部门以外的工业用) 压缩机多用容积流量，并且习惯上用进气容积流量来表示压缩机的流通能力。单位常用  $\text{m}^3/\text{min}$ ，在空气分离、石油、化工等部门用的压缩机中常用标准状态下的容积流量，称为标准容积流量，单位是  $\text{m}^3/\text{h}$  (N)，所谓标准状态 (N)，一般规定压力和温度分别为  $1.01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  和  $273\text{K}$  的气体

状态。

## 2. 排气压力和压力比

工业透平式压缩机铭牌习惯标明排气压力,对一些运输式压缩机习惯标明压力比(简称压比)。压比  $\epsilon_c$  为:

$$\epsilon_c = \frac{\text{排气绝压 } p_d}{\text{进气绝压 } p_a}$$

## 3. 转速

指压缩机转子旋转速度,单位是 r/min。

## 4. 功率

指驱动压缩机所需的轴功率和驱动机的功率等,单位常用 kW。

## 5. 效率(后面有专门章节讨论)

除效率外,上述参数都应在压缩机铭牌上标出,并同时注明其进气条件(压力、温度、相对湿度)和气体介质。

# 第三节 透平式压缩机发展概况

实用透平式压缩机在工业上出现之前,活塞式压缩机早已获得了普遍应用,在 19 世纪活塞式压缩机几乎成了实际上应用的唯一型式。活塞式压缩机由于存在单机容量小、机器笨重、易损件多和滑油消耗量大等许多缺点,很难满足生产发展的需要。随着科学技术的进步,在解决了热力学、气体动力学、材料及机械制造等一系列重大问题之后,透平式压缩机才迅速发展起来。1900 年法国拉托厂首先制造了第一台高炉鼓风用离心式压缩机,6 年后,瑞士的布朗鲍威尔开始生产拉托型压缩机,从此在欧洲和美国便出现了离心式压缩机的生产热潮。实用轴流式压缩机的出现较离心式压缩机要晚些,虽然在 19 世纪末就有人提出过多级轴流式压缩机的概念,不少人为此做过很大努力,但都因效率低而未能获得推广,真正的发展是在 20 世纪 30 年代以后的事。还在 19 世纪末,英国的 C. A. 帕尔森根据轴流式透平的经验将多级反动式透平反转,得到第一台实验用轴流式压缩机,显然这种忽视压缩机和透平的重要区别的做法,必定导致压缩机效率低。后来他又利用透平叶型试制了一些轴流式压缩机,都因为效率低(小于 50%)而没有被推广使用。从 20 世纪 30 年代开始,由于航空事业的发展需要,对航空燃气轮机进行了大量的理论和试验研究,使轴流式压缩机不断完善,提高了效率。1934 年瑞士的 BBC 首次为超声速风洞制造了第一台多级轴流式压缩机,效率达 84%。从 20 世纪 40 年代开始,轴流式压缩机已广泛应用于航空燃气轮机中,迄今仍占有很重要的地位。现代轴流式压缩机效率可高达 86%~90%甚至更高,除航空发动机外,还广泛用于发电燃气透平、舰用燃气透平和机车燃气透平装置中。随着钢铁、石油、化工等企业不断大型化,轴流式压缩机在这些领域也获得了发展,特别是从用于高炉鼓风以来,一直被各国所重视和发展。为改善低负荷性能,1960 年瑞士 BBC 制造了第一台静叶可调轴流式高炉鼓风机,随后世界许多厂家在这方面都做了许多工作,使得静叶可调式轴流式压缩机已成为高炉鼓风机的主要机型。目前轴流式压缩机在流量为  $300 \sim 25000 \text{ m}^3/\text{min}$  (N),排气压力为  $(3 \sim 40) \times 10^5 \text{ Pa}$  的范围内得到广泛应用。

离心式压缩机在航空发动机上的应用经历了一些曲折。应该说第一台航空喷气式发动机采用的是离心式压缩机,但随着航空事业的飞速发展,对发动机的功率需求猛烈增长,利用轴流式压缩机更为合适,因而在 20 世纪 50 年代中期以后,航空用离心式压缩机的发展几乎停滞不前。一直到了 60 年代中期先进的军用直升机需要装备小的燃气轮机,才又刺激离心式压缩机的进一步发展。此时,还由于离心式压缩机制造工艺的新进展和气动力学研究的成就,大大扩大了离心式压缩机的应用范围。离心式压缩机已成功地应用到汽车、直升机用燃气轮机、柴油

机的增压器、空调、化工、石油等部门，并在许多部门中和容积式压缩机展开了竞争，取得了很好的成绩。透平式压缩机的主要优点是单机容量大、重量轻、体积小、结构简单、滑油消耗少，为生产大型化提供了条件。起先离心式压缩机只是在低中压方面在大型企业中取代活塞式压缩机，发展到今天，在高压领域内和在大型企业中已代替了活塞式压缩机。1956年美国的克拉克公司为日产1000t合成氨厂制造了氮氢合成气低压段离心式压缩机，排气压力只有 $25.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，到了1963年为得克萨斯的日产600t合成氨厂制造了世界第一台合成气高压离心式压缩机，排气压力达到 $155 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，耗功率为8800kW，从此离心式压缩机跨进了高压领域。随着高压离心式压缩机的有关关键技术（如高压密封、小流量叶轮的制作和防喘措施等方面）的进展，世界许多厂家已能生产出排气压力达 $(280 \sim 340) \times 10^5 \text{ Pa}$ 或更高的高压离心式压缩机，1972年依了得厂为压缩多种工艺气体制造的压缩机其排气压力已高达 $687 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。从进气流量范围看，离心式压缩在 $80 \sim 6000 \text{ m}^3/\text{min}(\text{N})$ 范围内得到广泛应用。

透平式压缩机用途很广，特别是在石油精炼（重整、催化裂化、润滑剂生产等）、化工（合成氨、尿素、甲烷、乙烯、复合肥料等）、天然气（输气工程、天然气液化等）以及空气分离、氧气站、冶炼等部门中的应用越来越广泛，已成为这些企业的关键设备。现结合透平式压缩机在合成氨、尿素厂中的应用情况作简要说明。20世纪70年代以来，为迅速改变我国化肥落后的面貌，先后从国外引进技术，建成了20多套以天然气为原料或以石脑油或以煤为原料的不同类型化肥厂，目前还在兴建并在以后还要兴建类似的化肥厂。在这些企业中的压缩机都采用透平式压缩机，多数是离心式压缩机。以天然气为原料的合成氨厂有压缩机4台，它们是原料气、空气、氨和合成气（氮、氢气）压缩机，连同尿素厂一台 $\text{CO}_2$ 压缩机都用蒸汽轮机驱动，利用工艺生产中的余热产生的蒸汽，节省大量电力，合理使用能源。这些压缩机无论是动力消耗还是投资都占有很大比例，如合成氨压缩机所耗动力约占该厂动力的87%，投资约占总投资的21%，尿素厂压缩机的动力占该厂动力的85%，投资约占18%。鉴于蒸汽轮机驱动的离心式压缩机组在化肥生产中所起的作用，常被人们称为化肥厂的“心脏”设备，因此，确保这些机组的正常运行对整个工厂的安全、稳定生产关系极大。国外许多大型化肥厂过去运行经验表明：因汽轮机压缩机故障而使整个工厂停工的约占25%，其中因设计不合理造成的事故占10%~15%，因操作不当而造成的事故占13%~15%。为了提高机组的运转率必须做到精心操作，周密维护，认真检修。

我国是世界上历史悠久的国家，勤劳的中国人民很早就懂得透平机械原理，并制造了结构轻巧、使用方便的风车。但是在新中国成立前，透平式压缩机制造业基本上属于空白，只有少数厂能生产少量低压的通风机和鼓风机。新中国成立以来，随着社会主义经济建设的发展，透平式压缩机制造业也从无到有得到迅速发展，除了各大汽轮机厂外，还有许多鼓风机专业生产厂家，如沈阳鼓风机厂、陕西鼓风机厂、上海鼓风机厂、武汉鼓风机厂等可以生产各种规格的工业透平式压缩机。透平式压缩机的理论研究、设计工作都取得了很大进展。除了自行设计外，还从国外引进技术，推动我国透平式压缩机事业的发展。早期，沈阳鼓风机厂从意大利新比隆引进了MCL（水平剖分型）、BCL（筒型）和PCL（输气管线用）三种系列压缩机技术之后，又从日本引进了DH系列压缩机，陕西鼓风机厂从瑞士苏尔寿公司引进轴流式压缩机技术，生产A系列（静压不可调）和AV系列（静压可调）多种规格轴流式压缩机。后来，我国又相继从国外引进了一些先进机型和技术，缩短了国内和国外的差距。目前我国从通风机、鼓风机到高压离心式压缩机、各种规格的轴流式压缩机都能生产，并为进一步发展打下了坚实的基础。

透平式压缩机的发展得益于许多学科发展和技术进步的成果，随着当代科学技术的突飞猛进，透平式压缩机无论是在性能上还是在安全可靠上都获得了很大的提高。随着气动力学全三元流动理论的发展，透平式压缩机的气动设计方法、计算分析软件日臻成熟并推广应用，透

平式压缩机理论得到深入的研究，使当今的透平式压缩机更具有先进的热力、气动性能；转子动力学的进步提高了压缩机的可靠性，机械制造业的现代化，保证了压缩机的先进设计性能和可靠性；轴端密封技术的不断进步，如干气密封的发展，有可能摒弃密封油系统；新型轴承的出现，特别是当前气体轴承、电磁轴承的发展，在不久的将来，很有可能在支承系统中摒弃滑油系统；故障诊断学的新成果为故障的诊断与排除提供了重要手段；控制理论和计算机技术的新发展，先进的压缩机性能控制、防喘控制和运行监控系统的采用，更大程度上提高了压缩机的运行安全可靠性等。看到当前透平式压缩机的发展步伐，有理由期待，崭新的结构紧凑、系统简便、效率更高、更安全可靠、先进监控系统装备的透平式压缩机会很快出现。

# 第一章 气体热力学和气体动力学基础

本章将简要介绍透平式压缩机理论中常用的一些气体热力学和气体动力学的基础知识，其中包括：气体热力性质、第一定律、压缩过程分析、一元定常流的基本方程等。

## 第一节 气体状态方程式

压缩机所处理的气体种类繁多，气体所处的状态千差万别。从气体的基本性质来看，根据其所处的状态不同可以分为两类。一类是气体所处的状态离液态较远，例如空气、氢、氧、氮等，其特点是密度小，分子与分子间的距离大，彼此间的引力很弱，一般在压力增加、温度降低时仍能离液态很远。对这类气体可以忽略分子本身所占体积和分子间引力的影响，抽象为理想气体，认为气体分子是一些弹性的、不占据体积的质点，相互间没有作用力，而使问题简化，这样的假设分析得出的许多规律对许多气体来说与实验总结出来的规律基本相符。另一类气体则不同，它所处的状态离液态很近，例如水蒸气和氨气等。这类气体和前类气体相反，一般密度大，分子之间距离小，彼此间的引力大，不能忽略分子本身所占的体积和分子之间引力的影响。这一类气体是真实气体。当然，严格说来，气体都是真实气体，只不过一些气体服从于或接近于理想气体的规律，而另一些则与理想气体规律差别较大。本书在不加说明时，气体都视作理想气体，对真实气体，结合其特点，也专门作一定说明。

### 一、理想气体状态方程式

前面提到热力状态，而气体的状态特性是通过压力、温度、比容、内能、焓、熵等参量来表明的，这些表明气体热力状态的量，称为状态参数。在这些状态参数中先来讨论前三个，因为压力  $p$ 、温度  $T$  和比容  $v$ （或者用密度  $\rho$ ， $\rho = \frac{1}{v}$ ）是三个可以测量的量，成为描写气体状态最常用的基本状态参数，而其他的状态参数都可以由它们导出。对理想气体来说，不管是什么气体，或者处在何种状态，都有一种共性，那就是

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

或 
$$p/\rho = RT \quad (1-2)$$

式中， $p$  为绝对压力，Pa 或  $\text{N/m}^2$ ； $T$  为热力学温度，K； $v$  为比容， $\text{m}^3/\text{kg}$ ； $\rho$  为密度， $\text{kg/m}^3$ ； $R$  称为气体常数， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。式(1-1)或式(1-2)称为理想气体状态方程，它表示出三个基本状态参数间的关系。上两式是对 1kg 质量气体写的，对于  $m$  kg 质量气体而言，则式(1-1)可写成

$$pV = mRT \quad (1-3)$$

式中， $V$  为气体的总容积， $\text{m}^3$ 。

为了确定气体常数  $R$ ，运用阿佛伽德罗定律：“当气体在  $1.0133 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  压力和 273K 温度的标准状态下时，1kmol 或  $\mu$  kg 任意气体（ $\mu$  为气体分子量）都占有  $22.4 \text{ m}^3(\text{N})$  的容积”。这种性质与气体种类无关。于是由式(1-3)得：

$$\begin{aligned} \mu R &= \frac{p\mu v}{T} = \frac{1.0133 \times 10^5 \times 22.4}{273} = 8414.3 \\ R &= \frac{8414.3}{\mu} \quad [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \end{aligned} \quad (1-4)$$

式(1-4)说明气体常数与分子量成反比。数 8414.3 称为通用气体常数，对不同种类气体都适用。

例：空气压缩机进口气体温度为  $38^{\circ}\text{C}$ ，进口气体压力为  $0.910 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ，质量流量为  $50868 \text{ kg/h}$ ，试求其进口容积流量是多少？换算到标准状态的容积流量又是多少？空气的气体常数  $R=287.4 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

解：由式(1-3) 得：

$$Q_a = \frac{G}{p_a} R T_a$$

式中， $Q_a$  为进口容积流量；下标  $a$  为压缩机进口； $G$  为质量流量。

$$Q_a = 50868 \times 287.4 \times (273 + 38) \frac{1}{0.910 \times 10^5} = 49963 \text{ m}^3/\text{h}$$

用下标“N”表示标准状态，由两个状态下质量流量相同得

$$\frac{p_a Q_a}{T_a} = \frac{p_N Q_N}{T_N}$$

$$\text{由此} \quad Q_N = Q_a \frac{p_a}{p_N} \times \frac{T_N}{T_a} = 49963 \times \frac{0.910}{1.0133} \times \frac{273}{311} = 39387 \text{ m}^3/\text{h(N)}$$

## 二、真实气体状态方程式

真实气体不能像理想气体物理模型那样忽略气体分子自身的体积和分子间的相互作用两个重要因素，必须考虑它们的影响。不同气体的分子结构和形状不同，相互作用也不同。从组成分子的原子结构来看，正电荷的中心和负电荷的中心对不同的分子结构可能重合，也可能不重合。不重合时，正、负电荷中心相距一定距离，构成电偶极矩，这样的分子称为极性分子，重合时，则没有电偶极矩，这就是非极性分子，电偶极矩很小的分子称为弱极性分子。分子结构的不同，分子间的相互作用力也就不同。根据分子结构的这种分类可以将真实气体分为极性气体、弱极性气体和非极性气体，还有少数分子量很轻的气体如  $\text{Ne}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{He}$  等，由于量子效应显著，而称为量子气体。度量电偶极矩的单位是德拜  $\text{D}$  (Debye)。在确定状态方程式时还常常用到偏心因子  $\omega$ ，它是分子偏心程度或非球形程度的量度，主要考虑到非球形分子的分子间作用力不只是分子中心间作用力，而应是分子间各部分作用力的总和。电偶极矩和  $\omega$  一般可由气体性质表查到。

一百多年来通过理论分析为主推导的和根据实验数据为基础归纳总结的真实气体状态方程已经很多，其中有的是专用状态方程，专门适用于一定气体，精度高，但通用性差，另一类是通用状态方程，可适用于各种气体，虽准确度不及专用方程，但形式比专用方程简单，使用比较方便，其中有几种准确度比较高的通用状态方程，在工程上对热力性能计算分析、系统优化等，应用十分广泛。本书介绍真实气体计算一般特点，在本章最后一节介绍在透平式压缩机性能计算分析中应用较多的 LK (Lee Kesler) 和 MH 方程。

真实气体状态方程式也可以由对理想气体状态方程进行修正得到

$$pv = zRT \quad (1-5)$$

式中， $z$  称为压缩性系数或可压因子。它表示在相同压力和温度下真实气体比容  $v$  和视之为理想气体比容  $v_{id}$  之比，即  $z = v/v_{id}$ ， $z > 1$ ，表示  $v > v_{id}$ ； $z = 1$ ，真实气体符合理想气体规律； $z < 1$ ，表示按理想气体规律算得的比容值大于实际值。压缩系数随气体压力、温度变化，对于不同气体可利用对比态定律，找出近似的通用变化规律。所谓对比态定律最早是范德瓦耳在 1881 年提出来的，是个半经验定律。按照这个定律，不同气体在相同的对比压力  $p_r = p/p_c$  和对比温度  $T_r = T/T_c$  下，具有相同的对比比容  $v_r = v/v_c$ ，其中  $p_c$ 、 $T_c$ 、 $v_c$  分别为临界压力、临界温度和临界比容。一些气体的临界参数见附录二。工程上将对比参数相同的状态称为对比态，根据对比态定律，处于对比态的气体应具有相同的压缩性系数，由此可知， $z$  是  $p_r$ 、 $T_r$  的函数，因为  $v_r$  本身是  $p_r$  和  $T_r$  的函数。由式(1-5) 得

$$\begin{aligned} z &= \frac{pv}{RT} = \frac{p_r v_r}{RT_r} \times \frac{p_c v_c}{T_c} \\ &= \frac{p_r v_r}{T_r} z_c \end{aligned}$$

即  $z = f(p_r, T_r, z_c)$

式中， $z_c$  为临界压缩系数，根据实验发现，许多分子结构排列无序的非极性气体， $z_c = 0.26 \sim 0.28$ ，相差不多，取  $z_c = 0.27$ 。根据实验数据可将  $z$  整理成是  $p_r$ 、 $T_r$  的函数关系曲线，称为压缩性系数通用图（图 1-1）。该图对空气、氩气、二氧化碳、甲烷、乙烷、丙烷、乙烯等在  $T_r = 0.6 \sim 15$ 、 $p_r = 0 \sim 40$  范围内适用；对氨、氢、氮、氟化甲基、水蒸气等气体，精度低，而且对氢及氮只适应于  $T_r > 2.5$  的范围，在计算时还必须采用如下准临界参数：

$$p'_c = p_c + 7.85 \times 10^5 \text{ Pa} \tag{1-6}$$

$$T'_c = T_c + 8 \text{ K} \tag{1-7}$$

例：利用图 1-1 查甲烷在温度为 50℃ 和压力为  $147.2 \times 10^5 \text{ Pa}$  时的压缩性系数。

解：对甲烷有  $p_c = 46.4 \times 10^5 \text{ Pa}$ ， $T_c = 190.5 \text{ K}$ ，对比压强和对比温度为

$$p_r = p/p_c = 147.2/46.4 = 3.17$$

$$T_r = T/T_c = (273 + 50)/190.5 = 1.696$$

由图 1-1 查到  $z = 0.88$ ，说明甲烷在给定状态下实际比容值比按照理想气体状态方程计算的比容值要小 12%。

为适应真实气体热力性质参数的计算，状态方程很多，如在制冷工程对许多制冷剂的蒸汽可用如下状态方程式<sup>[34]</sup> 来确定  $z$ ，在  $T_r \geq 0.7$ ， $p_r \leq 0.6$  范围内有较好的精度，误差不超过 1%。

